
ATOM
KERNREAKTOREN

SCHRIFTENREIHE
DER DEUTSCHEN GESELLSCHAFT
FÜR ATOMENERGIE e.V., Bonn
VOLKSBILDUNG

Heft 2

Einführung in die Reaktorphysik und Reaktortechnik von Prof. Dr. Werner Kliefoth, Heidenheim (Brenz)

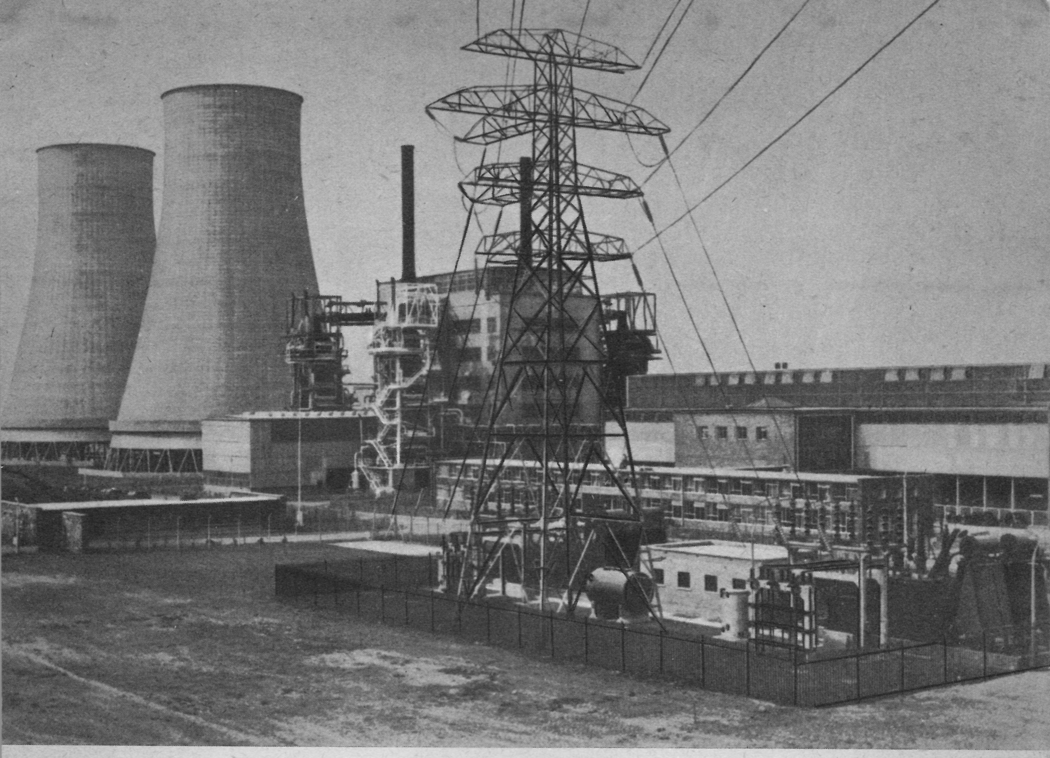
Satz, Druck und Graphik:
W. Kohlhammer, Stuttgart

Abbildungen

1. Umschlagseite
Schnitt durch den Forschungsreaktor der Technischen Hochschule München

4. Umschlagseite
Schnitt durch den Forschungsreaktor der Universität Frankfurt (Main)

1958



British Features

Calder Hall - das erste industrielle Kernkraftwerk der Welt - liefert seit dem 17.10.1956 Strom in das britische Elektrizitätsnetz

In Berlin entdeckten im Dezember 1938 Otto Hahn und Fritz Strassmann bei der Bestrahlung des schweren Elementes Uran, daß der Kern des Uranisotops 235 durch ein Neutron in zwei mittelschwere Elemente von etwa gleicher Größe gespalten werden kann. Sogleich wurde dieser Versuch in vielen Laboratorien in allen Kulturstaaten wiederholt und bestätigt. Dabei fanden mehrere Forscher unabhängig voneinander, daß aus dem gespaltenen Urankern unter Freisetzung einer ungeheuren Energie Neutronen austreten. Ein Neutron, das aus dem gespaltenen Kern freigesetzt worden ist, kann in einen anderen Kern eindringen und diesen wiederum spalten. Wenn dieser seinerseits wieder ein Neutron für eine Kernspaltung liefert, so kann sich der Prozeß immer weiter fortsetzen. Es entsteht eine Kettenreaktion.
Bereits im Dezember 1942 lieferte Enrico Fermi in dem nach seinen Plänen unter einer Sportplatztribüne in Chicago gebauten Reaktor den Nachweis, daß diese Kettenreaktion gesteuert und technisch verwertet werden kann. Heute – 15 Jahre danach – liefert die Reaktorstation Calder Hall Strom in das britische Versorgungsnetz, befahren mit Kernenergie angetriebene amerikanische und russische Schiffe die Weltmeere, befinden sich in technisch fortgeschrittenen Ländern mit Kernenergie-Triebwerken ausgerüstete Flugzeuge und Raketen in der Entwicklung und Erprobung. Ein neuer Abschnitt des technischen Zeitalters ist angebrochen. Um diese Entwicklung verstehen zu können, ist es notwendig, sich mit den Grundlagen vertraut zu machen, auf denen diese Entwicklung beruht.

Einführung in die Reaktorphysik und Reaktortechnik

von Prof. Dr. Werner Kliefoth

Das Atom ist nicht unteilbar

Die Vorstellung, daß ein Atom[1] unteilbar ist, wurde um die Jahrhundertwende widerlegt. Die französischen Forscher Pierre und Marie Curie entdeckten 1898 das Radium, ein Element, das die Eigenschaft hat, sich unter Aussendung von Alpha-Strahlung in ein anderes Element, die Radium-Emanation (auch Radon genannt) umzuwandeln. Radon selbst geht wiederum unter Aussendung von „radioaktiver" Strahlung in ein ebenfalls radioaktives Element (Radium A) über. Bald nach Entdeckung des Radiums und des ebenfalls von den Curies entdeckten Poloniums wurden weitere Elemente (Uran, Thorium u. a.) mit der gleichen Eigenschaft gefunden: ihre Atomkerne verwandeln sich unter Aussendung von Strahlung.

Der Atomkern

Nach der modellmäßigen Vorstellung besteht ein Atom aus einem Kern, der von einer Zahl von Elektronen umkreist wird. Ein Atom im normalen Zustand ist ein elektrisch neutrales Gebilde. Da die Elektronen Träger der negativen elektrischen Elementarladung sind, muß der Atomkern, wenn das Atom neutral sein soll, elektrisch positiv geladen sein. Das Atom hat einen Durchmesser von etwa 10^{-8} cm, das sind ein Zehnmillionstel Millimeter; man müßte zehn Millionen Atome aneinanderreihen, um eine Kette von 1 mm Länge zu erhalten. Der Atomkern, in dem der überwiegende Teil der Masse konzentriert ist, hat einen rund 10000mal kleineren Durchmesser (10^{-12} cm). Der größte Teil des Atoms ist „leer"; da die Masse eines Elektrons nur den 1840. Teil der Masse des leichtesten Elements, des Wasserstoffs, ausmacht, spielt sie dem Kern gegenüber keine wesentliche Rolle[2].

Protonen und Neutronen

Die Atomkerne aller Elemente bestehen aus Protonen und Neutronen; beide sind ungefähr gleich schwer. Ein Proton besitzt die positive Elementarladung, somit sind die Protonen Träger der positiven Ladung des Kerns, die Neutronen sind ungeladene Teilchen. Bei einem elektrisch neutralen Atom ist die Zahl der negativ geladenen Elektronen und die der positiv geladenen Protonen gleich groß. Die Zahl der Protonen eines Elements („Kernladungszahl") nennt man auch seine Ordnungszahl. Die „Massenzahl" eines Atoms ist durch die Summe von Protonen und Neutronen bestimmt. Wasserstoff, das leichteste aller chemischen Elemente mit der Massenzahl 1 und der Kernladungszahl 1, besitzt als Kern nur ein Proton; dieser wird von einem Elektron umkreist. Ein Proton ist also identisch mit einem Wasserstoffkern. Der Kern des Urans, des schwersten in der Natur vorkommenden Elements, besitzt 92 Protonen und 146 Neutronen, so daß seine Massenzahl 238 beträgt. Die Zahl der Protonen („Kernladungszahl") schreibt man unten links als Index an das chemische Symbol des Atoms, die Massenzahl als Index links oben. Es heißt also für Uran:

$$^{238}_{92}U$$

[1] atomos (griechisch) = unteilbar.

[2] Wäre es möglich, die Atomkerne des Elements Blei völlig dicht, d. h. also ohne „Zwischenraum" in einen Würfel von 1 cm Kantenlänge zu packen, so hätte diese „Kernmasse" von 1 cm^3 Volumen ein Gewicht von $1{,}5 \cdot 10^{14}$ Gramm das sind 150 Millionen Tonnen. Bei solch dichter Packung würde die Gesamtmasse der Erde von $6 \cdot 10^{21}$ Tonnen in einer Kugel von einem Durchmesser von rund 420 m Platz haben!

für Wasserstoff:

$$^{1}_{1}H,$$

und für das nächstschwere Element Helium:

$$^{4}_{2}He.$$

Aus diesem Symbol läßt sich ablesen, daß der Heliumkern zwei Protonen und zwei Neutronen besitzt; er wird von zwei Elektronen umkreist.

Isotope

Neben dem Uran mit der Massenzahl 238 gibt es noch eine andere „Sorte“ Uran, auch mit der Kernladungszahl 92, aber mit der Massenzahl 235; d. h. also, dieses Uran besitzt nur 143 Neutronen. Das chemische Verhalten von

$$^{235}_{92}U$$

ist das gleiche wie das von $^{238}_{92}U$. Die Zahl der Elektronen in der äußeren Hülle ist bei beiden Sorten Uran dieselbe, also auch die der Protonen. Sie unterscheiden sich aber in der Zahl der Neutronen. Solche Elemente mit gleicher Kernladungszahl aber verschiedener Massenzahl nennt man Isotope. Wasserstoff hat ebenfalls Isotope, und zwar den schweren Wasserstoff, auch Deuterium genannt, und das Tritium.

Tabelle 1:

Isotope des Wasserstoffs

	Symbol	Name des Kerns	Massenzahl	Vorkommen im natürlichen Wasserstoff	
Wasserstoff	$^{1}_{1}H = H$	Proton (p)	1	99,985%	stabil
Schwerer Wasserstoff (Deuterium)	$^{2}_{1}H = D$	Deuteron (d)	2	0,015%	stabil
Überschwerer Wasserstoff (Tritium)	$^{3}_{1}H = T$	Triton (t)	3	—	instabil

Der Kern des schweren Wasserstoffs besitzt außer einem Proton noch ein Neutron; seine Massenzahl ist also 2, die Protonenzahl ist wie bei gewöhnlichem Wasserstoff 1, also lautet das Symbol $^{2}_{1}H$. Mit Sauerstoff zusammen bildet er das schwere Wasser (D_2O), das zu etwa 0,015 Prozent im natürlichen Wasser vorkommt. Das Tritium ist der „überschwere“ Wasserstoff – dreimal so schwer wie gewöhnlicher Wasserstoff – mit zwei Neutronen neben einem Proton im Kern, gekennzeichnet durch das Symbol $^{3}_{1}H$. Tritium ist kein stabiles Element[3], es ist radioaktiv und verwandelt sich in ein Heliumisotop. Es kommt in der Natur nicht vor. Wir unterscheiden natürliche und künstliche Isotope.

[3] Die Halbwertszeit (vgl. S. 4) beträgt 12,46 Jahre.

Radioaktivität Stoffe, die Strahlung aussenden, nennt man „radioaktiv"; nach dem Entdecker Becquerel bezeichnet man die Strahlung mit den Anfangsbuchstaben des griechischen Alphabets mit Alpha-, Beta- und Gamma-Strahlen. α-Strahlen sind elektrisch geladene Teilchen, und zwar die Kerne von Helium; ihnen fehlen die beiden Außenelektronen, daher sind sie doppelt positiv geladen; β-Strahlen sind Elektronenstrahlen, also negativ geladene Teilchen, und γ-Strahlen sind wie die Röntgenstrahlen Wellenstrahlen, nur kurzwelliger (Tabelle 2). Radium $\left({}^{226}_{88}Ra\right)$ sendet α-Strahlen aus

Tabelle 2:

Wichtige Elementarteilchen

	Ladung (e: Elementarladung)	Masse
Proton (Wasserstoffkern)	$+e$	$1{,}6723 \cdot 10^{-24}$ g
Neutron	0	$1{,}6746 \cdot 10^{-24}$ g
Elektron	$-e$	$0{,}9107 \cdot 10^{-27}$ g
α-Teilchen (Heliumkern)	$+2e$	$6{,}643 \cdot 10^{-24}$ g

und verwandelt sich in das radioaktive Gas Radon $\left({}^{222}_{86}Rn\right)$ Die Zeit, die vergeht, bis die Hälfte der radioaktiven Substanz zerfallen ist, nennt man ihre Halbwertszeit. **Halbwertszeit** Sie beträgt für Radium 1580 Jahre, für Radon rund vier Tage, für Uran 4,5 Milliarden Jahre. Die Halbwertszeit ist eine für jeden radioaktiven Stoff charakteristische Größe. Der Zerfall von Atomkernen, sei es durch α-Strahlung oder auch unter Aussendung von β- und γ-Strahlen

Tabelle 3:

Halbwertszeit einiger natürlich-radioaktiver Substanzen*

Radium (Ra)	1590 a
Radium-Emanation (Radon - Rn)	3,82 d
Radium A (RaA)	3,05 m
Polonium (Po)	138 d
Aktinium (Ac)	22 a
Thorium (Th)	$1{,}39 \cdot 10^{10}$ a
Uran 238 $\left({}^{238}U\right)$	$4{,}5 \cdot 10^{9}$ a
Uran 235 $\left({}^{235}U\right)$	$7{,}13 \cdot 10^{8}$ a

* a von annum = Jahr
d von dies = Tag
m = Minute

und von Neutronen, ist eine Eigenschaft der sogenannten instabilen Atomkerne. In Tabelle 3 sind die Halbwertszeiten einiger natürlich-radioaktiver Substanzen zusammengestellt. Es ist auch gelungen, stabile Kerne künstlich umzuwandeln.

Kernkräfte

Im Atomkern, der z. B. beim Uran 92 positiv geladene Protonen enthält, die sich wegen ihrer gleichnamigen Ladung gegenseitig elektrisch abstoßen, müssen Kräfte vorhanden sein, die den Zusammenhalt des Kerns bewirken und verhindern, daß die abstoßenden elektrischen Kräfte ihn auseinandertreiben. Die Anziehungskräfte zwischen den Bausteinen der Kerne, den Protonen und Neutronen – man faßt sie auch unter dem Namen Nukleonen (von nucleus = der Kern) zusammen – heißen Kernkräfte oder auch Bindungskräfte. Sie sind eine neue Art von Kräften, völlig anders als elektrische oder Massenanziehungskräfte. Sie werden erst wirksam, wenn die Nukleonen sich einander auf geringe Entfernung genähert haben, sich fast berühren (Abstand etwa ein Millionstel von einem Millionstel Millimeter: 10^{-12} mm). Diese Kräfte sind sehr groß: die unsere materielle Welt bildenden Atomkerne erweisen sich gegen alle äußeren Einwirkungen, wie hohe Erwärmung, starke Abkühlung, hoher Druck oder chemische Beeinflussung, als äußerst stabile Gebilde.

Massendefekt

Was wissen wir über die Kernkräfte der Nukleonen? Ein auf den ersten Blick merkwürdiger Widerspruch zu dem altbekannten Gesetz der Chemie von der Erhaltung der Masse gibt uns einen Hinweis. Es hat sich nämlich gezeigt, daß die Masse eines Atomkerns, den man aus Protonen und Neutronen aufbaut, kleiner ist als die Masse der Summe seiner Teile. So ist z. B. die Masse eines Heliumkerns (zwei Protonen und zwei Neutronen) um rund ¾% kleiner als die Summe der Masse der vier einzelnen Nukleonen. Das ist mit den klassischen Auffassungen der Physik und Chemie nicht zu verstehen. Eine Deutung dieses „Massendefektes" gibt das Einsteinsche Gesetz von der Äquivalenz von Masse und Energie. Nach ihm ist die Energie

Einsteinsches Gesetz

$$E = mc^2;$$

darin ist m die Masse und c^2 das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit. Der Verlust an Masse beim Zusammenbau eines Kerns aus Protonen und Neutronen muß nach dem Einsteinschen Gesetz ein Äquivalent finden in einer dem Massendefekt entsprechenden Menge an Energie. Man nennt sie die Bindungsenergie, könnte aber auch analog zu Prozessen in der Chemie von Bildungswärme sprechen. Sie muß aufgebracht werden, wenn der Kern wieder gespalten werden soll. Der Massendefekt ist also ein unmittelbares Maß für die Größe der Bindungsenergie der Atomkerne; je größer sie ist, desto stabiler ist der Atomkern.

Beim Aufbau eines Heliumkerns aus seinen vier Bausteinen (Fusion) wird eine Bindungsenergie von 28,3 MeV frei[4]. Der Vorgang der Fusion ist also eine Möglichkeit zur Gewinnung von Kernenergie. Würde man 1 kg Helium aus Protonen und Neutronen zusammenfügen, so würde eine Energie von rund 200 Millionen kWh frei werden. Durch einen derartigen Prozeß gewinnen die Fixsterne ihre Strahlungsenergie. Auf demselben

[4] Die atomaren Energien mißt man in Elektronen-Volt (eV); das ist die Energie, die ein Elektron beim Durchlaufen einer Spannungsdifferenz von einem Volt erlangt. 1 Million-Elektronenvolt = 1 MeV = $1{,}6 \cdot 10^{-6}$ erg; vergleichend sei vermerkt: 1 kWh = $3{,}6 \cdot 10^{13}$ erg, und 1 MeV = $4{,}45 \cdot 10^{-20}$ kWh.

Prinzip beruht die Energiegewinnung bei der Explosion einer Wasserstoffbombe. Bemühungen und Versuche, die Fusionsenergie durch einen kontrollierten Ablauf der Verschmelzung auch friedlichen Zwecken nutzbar zu machen, werden von Physikern in den USA, der Sowjetunion, Großbritannien, Frankreich, Japan, Schweden und auch der Bundesrepublik angestellt.

Die nukleare Bindungsenergie je Nukleon in den Kernen ist etwa gleich groß; sie beträgt für die mittelschweren und schweren Kerne zwischen 7,5 und 8,5 MeV. Die oben erwähnten Helium-Kerne sind eine so fest gebundene Einheit von Nukleonen, daß sie von radioaktiven Elementen auch als Ganzes ausgesandt werden.

Kernenergie durch Verschmelzung

Verfolgt man die Größe der Bindungsenergie je Nukleon genauer von den leichten bis zu den schweren Elementen, so zeigt sich, daß ihr Wert in dem oben angegebenen Bereich bei den mittleren Kernen (um die Massenzahl 100 herum) den größten Wert erreicht (rund 8,5 MeV), um dann aber zu den schweren Elementen hin wieder abzunehmen (Abb. 1). So ist sie z. B. beim

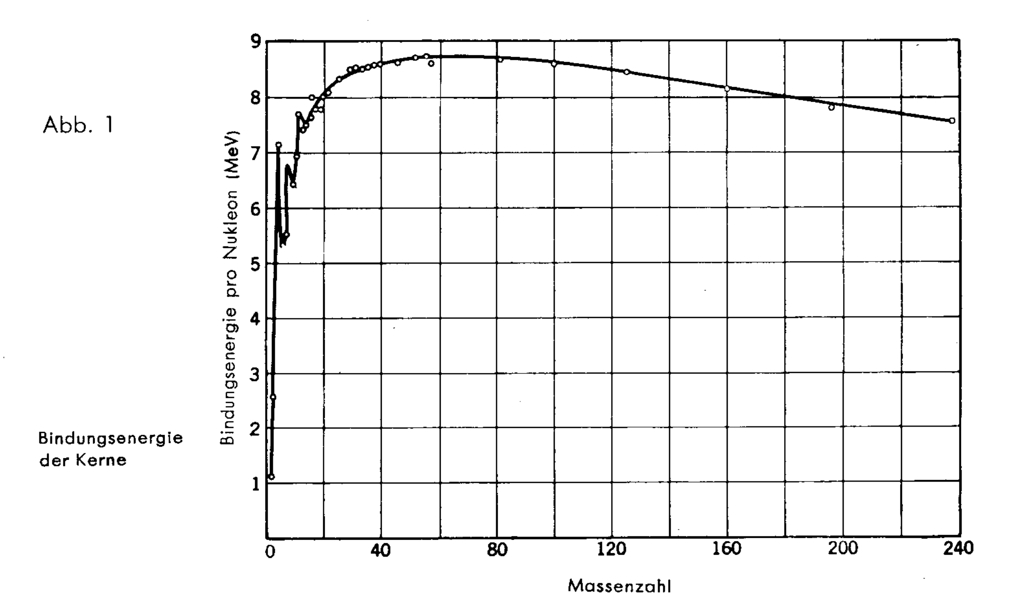


Abb. 1

Bindungsenergie der Kerne

Uran um etwa 1 MeV kleiner als bei den mittelschweren Elementen. Wenn es also gelingt, einen schweren Uran-Atomkern in zwei mittelschwere Kerne zu zerspalten, so müßte Bindungsenergie frei werden, und zwar im Mittel pro Nukleon 1 MeV. Das würde für Uran mit 238 Nukleonen eine Energie von der Größenordnung von 200 MeV je Spaltung eines Urankerns bedeuten. Hiermit ergibt sich aus der Spaltung von schweren Uran-

kernen eine weitere Quelle zur Gewinnung von Atomkernenergie. Diese Quelle wurde im Jahre 1938 erschlossen durch Versuche, die Professor O. Hahn und sein Mitarbeiter Professor F. Strassmann mit Uran anstellten. Dabei spielten Urankerne des bereits erwähnten Isotops mit der Masse 235 eine Rolle $\left({}^{235}_{92}U\right)$.

Versuch von Otto Hahn

Neben dem Uran 238 ist Uran 235 aber nur zu 0,7 % im natürlichen Uran enthalten. Bei Bestrahlung von Uran 235 mit langsamen oder „thermischen" Neutronen nimmt das Uranatom ein solches Neutron auf. Thermische Neutronen besitzen eine Energie von etwa 0,025 eV, das entspricht einer Geschwindigkeit der einzelnen Teilchen in der Größenordnung von 2000 m/sec, wie sie die Gasmoleküle durch ihre Wärmebewegung bei normaler Temperatur haben; daher heißen sie auch „thermische" Neutronen.

Durch die Aufnahme eines Neutrons entsteht beim Uran 235 ein sogenannter „Zwischenkern" (Uran mit der Masse 236), wobei eine Bindungsenergie von 6,81 MeV frei wird; das ist die Bindungsenergie pro Nukleon für Uran 235. Um nun einen Kern zu spalten, ist eine von Kern zu Kern verschiedene Energie, die Spaltungs- oder Aktivierungsenergie, notwendig. Die Aktivierungsenergie liegt bei Kernen mit der Massenzahl um 200 herum noch bei 50 MeV; erst bei Uran und Plutonium kommt sie in den Bereich von wenigen MeV. Bei Uran 235 beträgt sie nur 6 MeV, so daß der Kern durch die durch das aufgenommene Neutron freigewordene Bindungsenergie instabil wird und in zwei mittelschwere Bruchstücke – etwa Krypton 89 und Barium 144 – zerfällt; außerdem werden zwei oder drei Neutronen ausgeschleudert. In der Formelsprache der Physik lautet der beschriebene Vorgang:

Spaltvorgang

$$ {}^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{236}_{92}U \rightarrow {}^{89}_{36}Kr + {}^{144}_{56}Ba + 3\,{}^{1}_{0}n + 200\ \text{MeV} $$

Bei jeder Spaltung eines Uranatoms wird also nach vorstehender Beziehung ein außerordentlich hoher Energiebetrag von 200 MeV frei. Jeder der beiden neu entstehenden Atomkerne (z. B. Kr und Ba) erhält eine Energie von 60 bis 95 MeV. Beide sind elektrisch positiv geladen, sie stoßen sich infolgedessen im Augenblick des Entstehens ab und fliegen mit großer Energie auseinander. Bei der Bremsung dieser Kerne in der umgebenden Materie wird die Bewegungsenergie in Wärme verwandelt. Außerdem fliegen zwei oder drei Neutronen, die im Augenblick der Spaltung fortgeschleudert werden, mit einer Energie von etwa 2 MeV davon (das entspricht einer Geschwindigkeit von rund 10 000 km/sec); ferner wird noch Energie als β- und γ-Strahlung ausgesandt. Schließlich sind die neugebildeten Atomkerne, die sogenannten Spaltprodukte[5], stark radioaktiv.

Aus Uran 238 wird Plutonium

Das überwiegend im natürlichen Uran vorkommende Uran 238 wird durch thermische, also langsame Neutronen nicht gespalten; bei Uran 238 beträgt die Aktivierungsenergie 7,1 MeV, sie ist also größer als die Bindungsenergie je Nukleon von 5,3 MeV, d. h. der Energie, die durch das Aufnehmen eines Neutrons in

[5] Spaltprodukte ist die übliche Bezeichnung für Spaltungsprodukte, wohl zu unterscheiden vom spaltbaren Material (auch Spaltstoff oder Kernbrennstoff genannt), also z. B. dem Uran 235, das gespalten wird. Bei der Spaltung des Spaltstoffes Uran entstehen Spaltprodukte wie Strontium 90, Xenon 133, Krypton 85, Jod 131 usw.).

Tabelle 4:

Aktivierungs- oder Spaltungsenergie der Kerne und Bindungsenergie je Neutron

Kern	Spaltungsenergie (MeV)	Bindungsenergie je Neutron
Uran 235	6,0	6,8
Uran 238	7,1	5,3
Plutonium 239	5,0	6,6
Uran 233	6,0	7,0
Thorium 232	7,5	5,4

den Kernverband frei wird (Tabelle 4). Beim Uran 238 ist eine Spaltung nur mit sehr schnellen Neutronen möglich, welche die fehlende Energie zur Einleitung der Spaltung in Form von Bewegungsenergie mitbringen. Mit den Neutronen von geringerer Energie geschieht aber etwas anderes: das Neutron wird vom Kern des Uran 238 eingefangen und in den Kernverband eingebaut. Es entsteht wieder ein Zwischenkern, das Uranisotop 239, das unter Aussendung eines β-Teilchens[6] in ein neues Element, in das Transuran Neptunium, mit der Massenzahl 239 und der Kernladungszahl 93 übergeht; es ist wieder radioaktiv und sendet nochmals ein β-Teilchen aus, das heißt also ein mit der negativen Elementarladung behaftetes Elektron. Es entsteht das Element Plutonium mit der Massenzahl 239 und der Kernladungszahl 94, also mit dem Symbol $\left(^{239}_{94}Pu\right)$, das ebenso wie Uran 235 für die Kernspaltung brauchbar ist. Die Reaktionsgleichung heißt dann, wenn man dem ausgesandten β-Teilchen mit negativer Elementarladung (−1) und der Masse, die praktisch gleich Null ist, das Symbol $^{1}_{0}e$ gibt:

$$^{238}_{92}U + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{239}_{92}U \xrightarrow{\nearrow ^{0}_{-1}e} ^{239}_{93}Np + \xrightarrow{\nearrow ^{0}_{-1}e} ^{239}_{94}Pu$$

Diesen Vorgang bezeichnet man mit einer etwas summarischen Ausdrucksweise als „breeding" (Brüten). Auf ihm beruht der sogenannte Brutreaktor. Das Plutonium 239 läßt sich ebenso wie Uran 235 mit langsamen Neutronen spalten (Tabelle 4) unter Gewinnung einer ähnlich großen Energiemenge. Spaltbar ist ebenfalls das Uranisotop mit der Masse 233, das zwar im natürlichen Uran nicht vorkommt, das man aber durch einen entsprechenden Prozeß aus dem Thoriumkern mit der Masse 232 durch Anlagerung eines langsamen Neutrons erhält. Angemerkt sei zum Schluß dieser Überlegungen noch, daß alle drei Kerne der leicht spaltbaren Elemente ^{235}U, ^{239}Pu und ^{233}U eine ungerade Anzahl von Neutronen haben. Diese Kerne sind offenbar

[6] Das β-Teilchen stammt aus einem hier nicht näher beschriebenen Kernprozeß, einem sogenannten β-Kernzerfall.

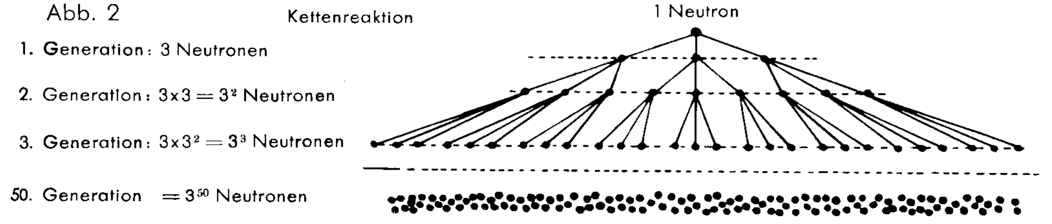
weniger stabil als die Kerne mit geraden Neutronenzahlen, also z. B. ^{238}U oder ^{232}Th.

Energie aus 1 kg Uran 235

Von der Spaltung von ^{235}U-Kernen durch langsame Neutronen bis zur Ausnutzung der dabei freiwerdenden Energiemenge fehlen uns in unserer Betrachtung noch einige wesentliche Schritte. Bei einer Spaltung von 1 kg Uran 235, die sich allerdings praktisch nicht vollständig verwirklichen läßt, würde in der äußerst kurzen Zeit von weniger als einer Millionstel Sekunde eine Energie von 20 Millionen kWh, das sind 17 Milliarden kcal, frei werden. Das Problem der praktischen Energiegewinnung aus diesem Kernprozeß liegt einmal in der Aufgabe, eine solche Spaltung in großem Maßstab einzuleiten und ferner in der Frage, wie erreicht man, daß das Freiwerden dieser Energie nicht in einer Millionstel Sekunde geschieht, wie es bei der Explosion einer Atombombe der Fall ist, sondern in zeitlich vorgeschriebener kontrollierter Form.

Kettenreaktion

Ein für die Lösung der ersten Aufgabe – also der Einleitung eines Spaltprozesses in größerem Ausmaß – entscheidender Vorgang ist die Aussendung von zwei oder drei Neutronen aus dem Kern jedes gespaltenen Uranatoms. Diese zwei bis drei Neutronen sind in der Lage, neue Uranatome zu spalten. Nehmen wir den günstigen Fall, daß drei Neutronen entstehen (in Wirklichkeit sind es bei Uran 235 im Mittel 2,46 Neutronen pro Spaltung), so vermögen diese drei – wieder im günstigsten Fall – drei Urankerne zu spalten; danach stehen dreimal drei, also 9 Neutronen für weitere Spaltungen zur Verfügung usw. Die Neutronenzahl wächst lawinenartig an nach dem Gesetz einer geometrischen Reihe; einen derartigen Prozeß nennt man Kettenreaktion (Abb. 2).



Ob nun eine solche Kettenreaktion zustande kommt bzw. ob sie aufrechterhalten werden kann, hängt außer von dem Vorhandensein von „spaltbarem" Material von dem Schicksal der entstehenden Neutronen ab. Wenn die Reaktion nicht erlöschen soll, muß wenigstens ein Neutron aus jeder Spaltung wieder für eine neue Spaltung zur Verfügung stehen.
In reinem Uran 235 kann sich eine Kettenreaktion schlagartig entwickeln, da je Spaltung mehr als zwei Neutronen zur Verfügung stehen. Allerdings gilt dies nur mit der Einschränkung, daß die Zahl der durch die Oberfläche entweichenden Neutronen nicht zu groß ist. Die Neutronen besitzen keine elektrische Ladung, werden also auch von den Ladungen der Atome nicht beeinflußt und erleiden auf ihrem Wege durch die Materie wenig Störungen, sie besitzen daher ein beträchtliches Durchdringungsvermögen. Es besteht somit also die Gefahr, daß ein Teil der

bei der Spaltung entstehenden sehr energiereichen, d. h. sehr schnellen Neutronen, aus der Oberfläche des Urans austritt, für weitere Spaltprozesse verlorengeht und die Kettenreaktion zum Erliegen kommt. Dieser Verlust an Neutronen durch die Oberfläche wird um so kleiner, je größer die Masse des Urans ist, weil das Volumen eines Körpers schneller wächst als seine Oberfläche[7]. Für das Zustandekommen einer Kettenreaktion ist es deshalb wichtig, die Uranmasse nicht zu klein zu wählen. Unterhalb einer bestimmten Menge Uran kommt die Reaktion in der Tat nicht zustande, weil der Verlust an Neutronen durch die Oberfläche zu groß ist. Die Mindestmasse heißt „kritische Masse". Der Radius für eine Kugel aus reinem Uran 235 mit der kritischen Masse ergibt sich zu $r = 8{,}4$ cm; das ist eine Mindestmasse von rund 50 kg Uran 235. Die kritische Masse kann man jedoch durch verschiedene Kunstgriffe erheblich verkleinern.

Kritische Masse

Wir wissen jetzt, warum ein Stück Uran 235, auch in ganz reinem Zustand, völlig „harmlos" ist und nicht detoniert, falls es die Größe der kritischen Masse nicht überschreitet. Das für das Einsetzen einer Kettenreaktion bei Erreichen der kritischen Masse notwendige erste Neutron ist immer vorhanden. Eine Quelle ist das Uran selbst, da dieses radioaktiv ist, zwar nur sehr schwach (mit einer Halbwertszeit von 700 Million. Jahren), aber es zerfallen doch spontan, das heißt ohne äußeren Anlaß, immer eine gewisse Anzahl von Urankernen. Außerdem erzeugen die aus dem Weltall zu uns kommenden kosmischen Strahlen (Höhenstrahlung), die bis tief in die Erde eindringen, bei sogenannten Kernprozessen immer Neutronen. In 1 g natürlichem Uran ereignen sich pro Stunde durchschnittlich 23 Spontanspaltungen und Spaltungen durch Höhenstrahlneutronen.

Ist eine Kettenreaktion in natürlichem Uran möglich?

Es ergibt sich das auch für die Praxis wichtige Problem: Muß man zur Einleitung einer Kettenreaktion unbedingt reines Uran 235 verwenden, oder ist auch natürliches Uran dazu brauchbar, das ja nur zu 0,7% aus Uran 235 besteht? Das läuft auf die Frage hinaus, ob der „Vermehrungsfaktor" der Neutronen größer als 1 werden kann, wenn man kein reines Uran 235 benutzt. Zur Beantwortung dieser Frage müssen wir noch weitere Einzelheiten über das Verhalten von Uran 238 den Neutronen gegenüber kennenlernen. Wir wissen, daß die Energie von langsamen Neutronen zur Spaltung von Kernen von Uran 238 nicht ausreicht. Diese Kerne haben aber darüber hinaus, wie wir auch bereits erfahren haben, die Eigenschaft, Neutronen mit Vorliebe einzufangen und diese so der weiteren Spaltung zu entziehen.

Wirkungsquerschnitt

Zum besseren Verständnis der Vorgänge bei Kernprozessen hat man als Hilfsbegriff den Wirkungsquerschnitt eingeführt. Der Wirkungsquerschnitt ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, daß ein bestimmter Kernprozeß eintritt. Nach den Vorstellungen der Mechanik kann ein Neutron mit einem Atomkern nur zusammenstoßen, wenn es die Fläche des geometrischen Querschnitts des Kerns trifft. Da aber die wechselseitigen Kräftebeeinflussungen zwischen Kern und Neutron sich nicht auf den geometrischen Querschnitt des Atomkerns beschränken, kann man sich für jeden solchen Kernprozeß, also z. B. den einer Spaltung, anschaulich

[7] Zahlenbeispiel: Eine Kugel von 5 cm Radius hat ein Volumen von 524 cm^3 und eine Oberfläche von 314 cm^2; eine Kugel vom doppelten Radius, also von 10 cm, hat ein Volumen von 4189 cm^3 und eine Oberfläche von 1257 cm^2.

den Wirkungsbereich dieser Kräfte durch ein kleines „Zielscheibchen" ersetzt denken. Dies ist der Wirkungsquerschnitt des Kerns für eine Wechselwirkung mit dem Neutron; nur wenn das Neutron dieses Scheibchen durchfliegt, kommt es zu einer Wechselwirkung, also zu einer Kernreaktion. Der geometrische Querschnitt ist von der Größenordnung von 10^{-24} cm^2. Der definierte Wirkungsquerschnitt hat direkt nichts mit der Größe des geometrischen Querschnitts des Kerns zu tun. Er wird in Einheiten von 10^{-24} cm^2 gemessen; diese Einheit trägt die Bezeichnung barn. Die Wirkungsquerschnitte für Neutronen können bis zu einem Millionstel barn abnehmen, aber auch Werte von mehr als 10 000 barn erreichen. Ein hoher Wert des Wirkungsquerschnittes besagt, daß Neutronen, die in einer gewissen Entfernung am Kern vorbeifliegen, durchaus noch einen Prozeß in dem betreffenden Atomkern einzuleiten vermögen.

Streuung von Neutronen

Die hauptsächlichen Wechselwirkungen zwischen Atomkern und Neutronen sind Spaltung, Einfang und Streuung. Von den beiden ersten haben wir gesprochen. Wird ein Neutron von einem Kern „gestreut", so wird es aus seiner Bahn abgelenkt und gibt dabei mehr oder weniger große Mengen Energie an den Kern ab. Es gibt mancherlei Streuungsvorgänge in der Physik, z. B. bei der Reflexion einer bewegten Billardkugel an einer ruhenden; erstere wird von der abstoßenden elastischen Kraft aus der Bahn gelenkt, überträgt einen Teil ihrer Bewegungsenergie auf die ruhende Kugel und rollt mit verminderter Geschwindigkeit weiter. Sie verliert dabei um so mehr Energie, je mehr sich die Massen von gestossener und stossender Kugel ähneln. Eine Streuung bei anziehenden Kräften bewirken z. B. auch die Gravitationskräfte, sie sind im Gegensatz zu den Kernkräften jedoch sehr weitreichend. Ein Komet wird im Anziehungsbereich der Sonne aus seiner Bahn abgelenkt, auch das ist ein Fall von „Streuung". – Für jeden der drei oben angeführten Fälle von Wechselwirkungen gibt es gesonderte Werte für die Wirkungsquerschnitte; dabei ist zu beachten, daß diese nicht nur bei den einzelnen Elementen verschieden groß sind, sondern daß ihre Größe auch von der Geschwindigkeit (Energie) der Neutronen abhängt.

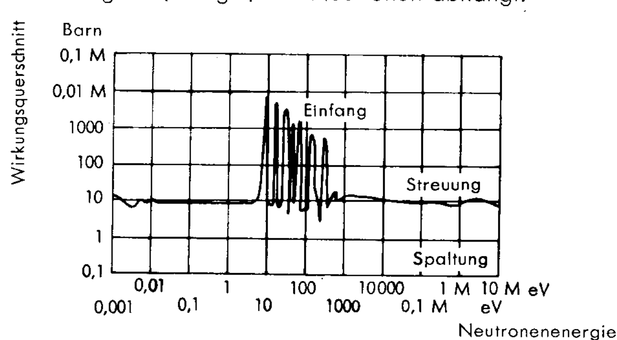


Abb. 3

Totaler Wirkungsquerschnitt von Uran 238

Resonanzeinfang bei Uran 238

Aus der Kurve der Abb. 3 erkennt man, daß Uran 238 eine besondere Neigung zeigt, Neutronen mit bestimmten mittleren Geschwindigkeiten (Energie) festzuhalten, zu absorbieren. Man sagt, daß der Wirkungsquerschnitt für diese Geschwindigkeit eine

Resonanzstelle habe. Die Resonanz spielt in der Reaktortechnik eine ebenso wichtige Rolle wie Resonanzeffekte in der sonstigen Technik; z. B. weisen Motore, die im allgemeinen ruhig laufen, für eine bestimmte Umlaufzahl starkes Vibrieren auf, das oft nicht ungefährlich ist und beseitigt werden muß.

Kontrollierte Kettenreaktion im Reaktor

Multiplikationsfaktor

Jetzt kennen wir die physikalischen Grundbegriffe soweit, daß wir die Vorgänge im Uranreaktor im einzelnen verfolgen können. Im Reaktor läuft eine kontrollierte Kettenreaktion ab, das heißt also, eine Kettenreaktion, die weder alle Grenzen überschreitet noch an Neutronenmangel zum Erliegen kommt. Der Multiplikationsfaktor k der Neutronen muß mindestens gleich oder besser ein wenig größer als 1 sein, das heißt für die weiteren Spaltungen muß im Durchschnitt immer wieder ein wenig mehr als 1 Neutron zur Verfügung stehen. Diese Zahl darf in der Praxis 1,0075 nicht überschreiten. 0,75% ist also der höchstzulässige Wert für den Neutronenüberschuß, anderenfalls ist der Reaktor nicht mehr regelbar. Beim Uran 235 entstehen im Mittel 2,46 Neutronen je Spaltprozeß, bei Plutonium sind es 2,88 und bei Uran 233 2,57 Neutronen. Das Schicksal dieser entstehenden Neutronen bestimmt zugleich das des Reaktors.

Im natürlichen Uran werden die Neutronen durch das zu 99,3% darin enthaltene Uran 238 eingefangen; weitere Neutronen werden von den übrigen Materialien der Reaktoranlage absorbiert, und schließlich gehen noch Neutronen in den Außenraum verloren. Es hat sich gezeigt, daß selbst in einer beliebig großen Menge von ganz reinem natürlichen Uran keine Kettenreaktion zustande kommt, der Multiplikationsfaktor der Neutronen also unter dem Wert 1 bleibt. Um bei natürlichem Uran doch eine Kettenreaktion einzuleiten, kann man prinzipiell zwei Wege einschlagen:

Anreicherung an Uran 235

1. Man vergrößert den Anteil an Uran 235 im natürlichen Uran und erhält dadurch mehr Spaltungen und gleichzeitig mehr Neutronen. Man spricht kurz von „angereichertem Uran". Die Isotopentrennung von Uran 238 und Uran 235 erfordert einen ungeheuren Aufwand an Energie und ist deshalb sehr teuer. Derartige Trennanlagen gibt es bisher nur in den USA, der Sowjetunion und England.

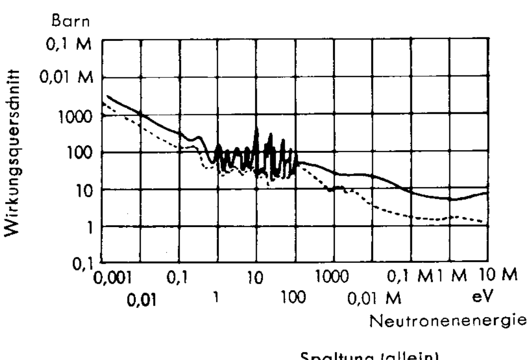


Abb. 4

Uran 235

Totale Wirkungsquerschnitte gegenüber Neutronen verschiedener Energie (logarithm. Maßstab)

2. Man vermindert die Geschwindigkeit der Neutronen durch zahlreiche elastische Zusammenstöße (Streuungen) im Reaktormaterial, bei denen sie Energie abgeben, soweit, daß diese unterhalb der Stelle des Resonanzeinfangs von Uran 238 (s. Abb. 3) liegt. Diese genügt, wie wir wissen, durchaus, um das Uran 235 zu spalten. Wie man aus der Kurve für Uran 235 in Abb. 4 ablesen kann, haben Neutronen mit kleiner Energie sogar einen großen Wirkungsquerschnitt für die Spaltung (Spaltungsquerschnitt), das heißt also, kleine Neutronenenergien ergeben eine erhöhte Ausbeute bei der Spaltung von Uran 235. Diese auf den ersten Augenblick überraschende Tatsache kann man sich durch folgende Überlegung plausibel machen: Fliegt ein Neutron „langsam" an einem Urankern vorbei, so ist die Wahrscheinlichkeit für eine wechselseitige Einwirkung zwischen Neutron und Kern größer als bei größerer Geschwindigkeit.

Moderator

Stoffe, die man dem Reaktor beigeben kann, um die Geschwindigkeit der Neutronen nach möglichst wenigen Zusammenstößen abzubremsen, bevor sie von Uran 238-Kernen eingefangen werden, heißen Moderatoren („Bremsmittel"). Als Moderator wählt man Stoffe, die praktisch keine oder nur sehr wenig Neutronen einfangen, dafür aber infolge ihres Atomgewichtes durch wenige elastische Zusammenstöße deren Energie sehr schnell unter die gefährliche Resonanzstelle von Uran 238 ermäßigen. Dazu eignen sich schweres Wasser, Graphit und Beryllium, auch leichtes Wasser.
Wasserstoffkerne – also Protonen – sind – obwohl sehr leicht – deshalb nicht so gut brauchbar, weil ihr Einfangquerschnitt für Neutronen groß ist. Gewöhnliches Wasser wird dann als Moderator verwendet, wenn der Überschuß an Neutronen erheblich ist, z. B. bei Uran, das mit Uran 235 angereichert ist. Schweres Wasser (D_2O) ist ein sehr guter aber teurer Moderator; Kohlenstoff in Form von Graphit ist zwar etwas weniger wirksam als schweres Wasser, aber billiger. Voraussetzung für eine Verwendung im Reaktor ist seine absolute Reinheit. Tab. 5 gibt die

Tabelle 5:

Wirkungsweise verschiedener Moderatoren

Moderator	Wasserstoff $^{1}_{1}H$	schwerer Wasserstoff $^{2}_{1}H$ (D)	Beryllium $^{9}_{4}Be$	Kohlenstoff (Graphit) $^{12}_{6}C$	Uran $^{238}_{92}U$
Zahl der Zusammenstöße zur Energieverminderung von 1,75 MeV auf 0,025 eV	18	25	86	114	2172
Absorptionsquerschnitt für thermische Neutronen (in barn)	0,325	0,0008	0,0085	0,005	2,8

Zahl der Zusammenstöße, die ein Spaltungsneutron erleiden muß, um seine Energie von 1,75 MeV auf die thermische Energie von 0,025 eV herabzumindern. Ferner sind in der Tabelle die Einfangquerschnitte für thermische Neutronen angegeben. Hier zeigen sich aufs Neue die hervorragende Eignung des schweren Wassers als Bremsmittel, die Brauchbarkeit von Graphit und die Nachteile bei der Verwendung von gewöhnlichem Wasser. Unter der Annahme, daß die Kerne des Urans und des Moderators gleichmäßig verteilt sind (homogene Mischung), spielt für den Wirkungsgrad des Moderators das Verhältnis der Anzahl der Kerne von Uran 238 zu der Zahl der Moderatorkerne eine Rolle. Es gibt ein gewisses optimales Verhältnis, für das der Multiplikationsfaktor k einen maximalen Wert erreicht. In Tabelle 6 sind für die günstigsten homogenen Mischungen von natürlichem Uran mit verschiedenen Bremssubstanzen die Maximalwerte von k, die erreichbar sind, angegeben. Daraus ist zu entnehmen, daß in natürlichem Uran in Verbindung mit einem Moderator eine Kettenreaktion nur dann möglich ist, wenn schweres Wasser als Moderator verwendet wird. Selbst Graphit reicht im Fall einer homogenen Durchmischung nicht aus. Homogen nennt man einen Reaktor, bei dem das Uran – oder allgemein der Kernbrennstoff des Reaktors – mit dem Moderator vermischt ist.

Tabelle 6:

Maximaler Wert für den Multiplikationsfaktor k bei optimalen homogenen Mischungen von natürlichem Uran und Moderator

Moderator	k
Wasser (H_2O)	0,62
Beryllium (Be)	0,66
Graphit (C)	0,84
Schweres Wasser (D_2O)	1,33

Homogener Reaktor

Heterogener Reaktor

Der Einfluß des schädlichen Resonanzeinfangs ändert sich, wenn das Uran in Form von Stäben, Blöcken oder als Gitter angeordnet ist und vom Moderator umgeben wird. Eine solche Anordnung heißt ein heterogener Reaktor. Er wurde zuerst von E. Fermi mit Graphit als Moderator im Jahre 1942 in Chicago gebaut. Der Multiplikationsfaktor liegt nur wenig über eins. Ein solcher Graphitreaktor ist erheblich größer als ein mit D_2O moderierter oder gar als ein Reaktor, dessen Kernbrennstoff mit Uran 235 angereichert ist. Für einen mit Graphit moderierten Reaktor braucht man etwa 30 Tonnen natürliches Uran, damit er „kritisch" wird, während man bei einem Schwerwasser-Reaktor bereits mit etwa drei Tonnen natürlichem Uran auskommt, und bei angereichertem Uran 235 sogar wenige Kilogramm genügen.

Neutronenreflektor

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Neutronenbilanz bietet die Verwendung eines Neutronenreflektors, etwa aus Graphit, schwerem Wasser oder Beryllium. Er hat die Aufgabe,

die Neutronen, die aus der Oberfläche des Reaktorherzens (engl. core) austreten, wieder in den Reaktorraum zurückzuwerfen. Durch die Verwendung eines Reflektors ist es auch möglich, die Größe der kritischen Masse (vgl. S. 10) bei Atombomben erheblich herabzusetzen.

Kontrollstäbe

Um die Kettenreaktion im Reaktor unter Kontrolle halten zu können, braucht man Reguliereinrichtungen, die ihn im stationären Betrieb auf den Multiplikationsfaktor $k = 1$ einstellen. Dazu benutzt man Stäbe aus Cadmium oder Borstahl, die wegen ihrer großen Einfangquerschnitte besonders starke Neutronenschlucker sind. Durch mehr oder weniger tiefes Einschieben der Kontrollstäbe in das Reaktorinnere wird der Neutronenfluß gesteuert, bei völligem Einführen kommt die Kettenreaktion zum Erliegen; der Reaktor ist abgestellt. Im Falle der Gefahr geschieht die Auslösung automatisch. Bei dem äußerst raschen Ablauf der Kettenreaktion in Millionstel Sekunden würde sich jedoch eine solche Art der Regelung des Neutronenflusses als viel zu träge erweisen. Bis die Kontrollstäbe das Innere des Reaktors erreicht haben, wäre er bereits „durchgegangen". Der Verlauf des Spaltvorganges selbst kommt aber dem Reaktorkonstrukteur zu Hilfe.

Verzögerte Neutronen

Die bei der Spaltung von Urankernen entstehenden Spaltprodukte sind zum größten Teil hochradioaktiv und senden außer den α-, β- und γ-Strahlen auch nach der Spaltung noch Neutronen aus. Diese Neutronen werden von den Spaltprodukten also nicht „prompt", sondern mit einer gewissen Verzögerung von durchschnittlich etwa 10 bis 20 Sekunden ausgeschleudert. Sie machen bei Uran 235 etwa 0,75 % der bei der Kernspaltung emittierten Neutronen aus. Der Multiplikationsfaktor liegt aber nur wenig über eins, so daß auch die „verzögerten" Neutronen noch für den letzten Anstoß beim Kritischwerden des Reaktors notwendig sind. Aus diesem Grunde wirkt sich eine momentane Verstärkung der Kettenreaktion erst im Laufe dieser Verzögerungsfrist aus. Diese Verzögerungszeit reicht dann aus, um die automatischen Steuerungsorgane in Tätigkeit zu setzen.

Aufbau eines Reaktors (Prinzip)

Abb. 5 gibt das Prinzip eines heterogenen Reaktors wieder, d. h. also eines Reaktors, bei dem Brennstoff und Moderator voneinander getrennt angeordnet sind. Der Brennstoff befindet sich in

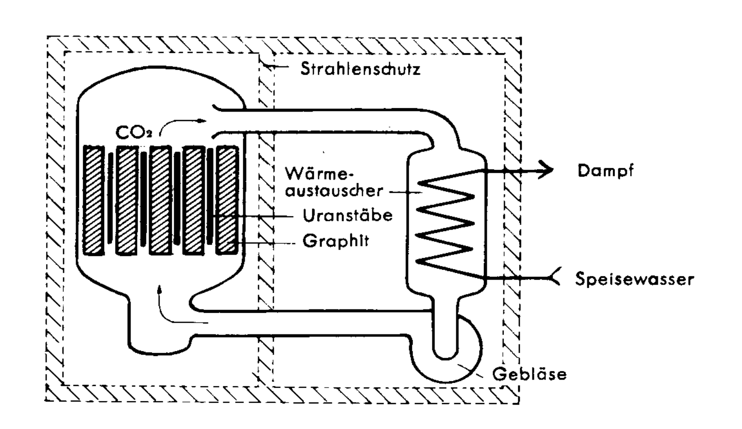


Abb. 5

Prinzipskizze eines heterogenen Reaktors

sogenannten Brennstoffelementen, das sind Stäbe aus natürlichem oder angereichertem Uran, die von vakuumdicht abschließenden Metallhülsen umgeben sind. Dadurch werden die entstehenden hochradioaktiven und äußerst gefährlichen Spaltprodukte zurückgehalten, und der Gefahr der Korrosion wird begegnet. Die in den Brennstoffelementen entstehende Wärmeenergie muß durch Kühlmittel abgeleitet werden.

Spaltprodukte

Bei der Uranspaltung entstehen etwa 300 verschiedene radioaktive Isotope. Die Vielzahl rührt daher, daß die Urankerne auf mannigfache Weise spalten und sich somit viele neue Atomkerne bilden. Diese hochradioaktiven Atomkerne bilden den Ausgangspunkt einer mehr oder minder langen Kette von Zerfallsprodukten. Ein Zerfall in völlig gleiche Teile ist verhältnismäßig selten. Besonders häufig sind die Spaltprodukte um die Massenzahl 90 bis 95 herum – das bekannteste ist Strontium 90 –, ein zweites Maximum gruppiert sich um die Massenzahl 140 (Barium 140, Caesium 137) (Abb. 6). Die Brennstoffelemente werden er-

„Atommüll"

neuert, wenn das Uran zum Teil gespalten ist und sich eine gewisse Menge Spaltstoffe – bekannt unter dem Namen „Atommüll" – gebildet hat. Die Menge der anfallenden Spaltstoffe ist gleich der Menge des verbrauchten Urans. Gewisse Spaltstoffe sind für die Wirksamkeit des Reaktors besonders schädlich, weil sie die unangenehme Eigenschaft haben, die Spalt-Neutronen wegzufangen, d. h. also, sie besitzen einen großen Wirkungsquerschnitt für die Absorption. Ein besonders starkes „Neutronengift" ist das Xenon 135 mit einem Einfangquerschnitt von 3500000 barn.

Reaktor als „Ofen"

Die Prinzipskizze Abb. 5 zeigt die wesentlichen Teile eines Reaktors: die Brennstoffstäbe, den Moderator, die Kühlflüssigkeit. Letztere leitet die entstehende Wärme zu einem Wärmeaustauscher, in dem Dampf erzeugt wird, welcher Turbinen antreibt; diese sind mit den elektrischen Generatoren eines Kraftwerkes verbunden. Der Reaktor ist für das Atomkraftwerk gleichsam der Ofen der Anlage, und in Fortführung dieses Vergleichs läßt sich das Uran als Brennstoff bezeichnen, während die Neutronen die Rolle des notwendigen „Sauerstoffs" für diese „Verbrennung" (Spaltung) übernehmen.

Aufgaben des Reaktors

Tabelle 7 gibt eine Übersicht über die wichtigsten möglichen Bestimmungsstücke eines Reaktors, deren Verwendung und Kombination abhängig sind vom Zweck, für den der Reaktor benutzt werden soll. Die Hauptverwendungszwecke für Reaktoren sind:

1. Forschung;
2. Energieerzeugung durch Leistungsreaktoren in Verbindung mit Kraftwerken oder zum Antrieb von Schiffen;
3. Produktion von Plutonium. Vielfach werden 2. und 3. miteinander verbunden; die englischen Reaktoren in Calder Hall sind solche Zwei-Zwecke-Reaktoren;
4. das „Brüten" von Uran 238 oder Thorium 232 zur Gewinnung von neuem spaltbarem Material (Plutonium 239 bzw. Uran 233);
5. Produktion von radioaktiven Isotopen.

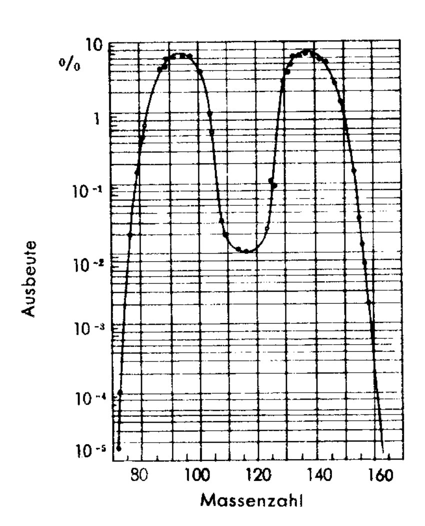
Tabelle 7:

Übersicht über Reaktortypen

Zweck	Forschung Leistung Produktion von Plutonium Brüten (^{238}U; ^{232}Th)	
Neutronen-energie	thermisch (bis 0,05 eV) intermediär 0,05 bis einige 10^3 eV, z. B. Reaktor-U-Boot „Nautilus", schnell (über 10^4 eV – ohne Moderator)	
Spaltstoff	Uran: natürlich ^{235}U: angereichert Pu (erbrütet aus ^{238}U) ^{233}U (^{232}Th)	
Komposition	homogen	Brennstoff als Lösung Suspension Legierung (U + B) Schmelze
	heterogen	
Moderator	Schweres Wasser (D_2O) Graphit (C) Wasser (H_2O) Beryllium (Be) Organische Stoffe	
Kühlung	Gas	Luft Kohlendioxyd Helium
	Wasser (H_2O) Schweres Wasser (D_2O) Quecksilber (Hg) Natrium (Na) Natrium-Kalium (Na-K)	
Leistung	klein mittel groß	
Form	Würfel Kugel Zylinder	

Abb. 6

Prozentuale Häufigkeit der Spaltprodukte von Uran 235 in Abhängigkeit von der Massenzahl



Schnelle Reaktoren Die Reaktoren können auch nach der Art ihrer Neutronen eingeteilt werden in thermische Reaktoren, die mit langsamen Neutronen arbeiten – von dieser Art sind die meisten in Betrieb befindlichen Reaktoren – und in schnelle Reaktoren, bei denen die Neutronen nicht gebremst werden, sie besitzen also keinen Moderator und können nur mit hochangereichertem Spaltstoff mittelschnelle Neutronen verwenden, nach der Art des Reaktors im Unterseeboot „Nautilus".

Eine weitere Klassifikation kennen wir bereits: heterogene und homogene Reaktoren. Beim heterogenen Reaktor ist der Kernbrennstoff im allgemeinen als Gitter oder in Form von Stäben im Moderator eingebettet oder von ihm umspült. Homogene Reaktoren enthalten den Spaltstoff in einer Art von Suspension oder als Lösung verteilt im Moderator; letzterer kann gleichzeitig auch als Kühlmittel dienen. Die meisten technischen Erfahrungen liegen zur Zeit mit heterogenen Reaktoren vor.

Kühlmittel Als Kühlmittel, d. h. als Wärmeträger für den Abtransport der im Reaktor erzeugten Wärme, werden verwendet:

Gase (Kohlendioxyd, Luft, Helium);

Flüssigkeiten (Wasser, schweres Wasser, organische Flüssigkeiten);

Flüssiges Metall (Natrium, Kalium, Wismut oder auch Legierungen aus diesen Metallen, die selbst bei Zimmertemperatur noch flüssig bleiben).

Bei Gaskühlung werden starke Gebläse benötigt, um das Gas in Umlauf zu setzen. Den Energiebedarf der Gebläse verringert man, indem man den Kreislauf des Kühlgases unter Druck setzt; dadurch wird der Wärmeübergang an das Gas erhöht und das zu fördernde Gasvolumen verkleinert. Der Erhöhung des

Druckwasser-Reaktor

Druckes ist jedoch durch die Wandstärke des Druckgefäßes, das den Reaktorkern mit einschließt, eine Grenze gesetzt. Die Wasserkühlung verlangt hohe Drucke im Kühlkreislauf, wenn das Sieden des Wassers verhindert werden soll. Dies ist das Prinzip des Druckwasserreaktors (Abb. 7). Wasserdampf verschlechtert die Wärmeableitung und erhöht die Korrosionsgefahr an den Brennstoffhülsen. Andererseits muß aber bei Leistungsreaktoren eine möglichst hohe Kühlmitteltemperatur erreicht werden, um den Wirkungsgrad der Anlage zu erhöhen.

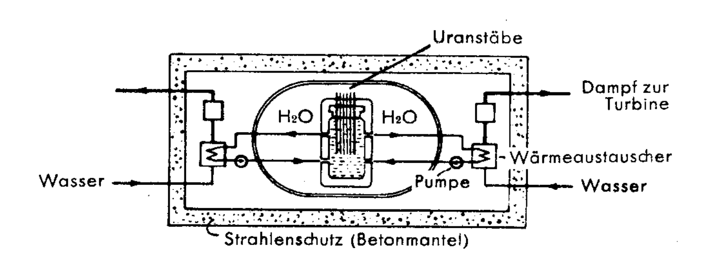


Abb. 7

Druckwasser-Reaktor mit Wasser (H_2O) als Moderator und Kühlmittel (Prinzipskizze)

Siedewasser-Reaktor

Ein anderer Typ eines wassergekühlten Reaktors, der Siedewasserreaktor, läßt das Wasser zum Sieden kommen; der entstehende Wasserdampf wird direkt in die Turbine geleitet. Da der Dampf radioaktiv ist, darf er nicht aus dem Turbinenkreislauf entweichen. Die Turbine befindet sich innerhalb der Strahlenabschirmung. Allerdings handelt es sich durchweg um kurzlebige Radioaktivität. Wichtig ist eine zuverlässige Dichtung der Brennstoffhülsen gegen das sie umspülende Wasser. Wassergekühlte Reaktoren sind in ihren Abmessungen im allgemeinen kleiner als gasgekühlte. Die Kühlung mit flüssigen Metallen bietet den Vorteil, daß höhere Temperaturen ohne die Verwendung von höheren Drucken möglich sind. Die Verwendung von flüssigen Metallen begegnet allerdings noch mancherlei materialtechnischen Schwierigkeiten, besonders solchen der Korrosion.
Aus den vielen theoretischen Möglichkeiten von Reaktortypen (Tabelle 7) haben sich etwa 20 als brauchbar erwiesen. Damit ist allerdings noch nicht entschieden, welche Typen sich endgültig in der Praxis durchsetzen werden.

Aufgaben der Forschungsreaktoren

Auf dem Atom-Programm der Bundesrepublik stehen Forschungsreaktoren an erster Stelle; sie werden im zweiten Teil dieser Broschüre im einzelnen aufgeführt. Forschungsreaktoren sind ein Hilfsmittel der Kernforschung, bilden aber gleichzeitig die erste Station auf dem Wege in die Kerntechnik. Es gibt Forschungsreaktoren der verschiedensten Typen und Größe. Die kleinsten mit Wärmeleistungen von einigen Milliwatt dienen ausschließlich Lehr- und Anlernzwecken; Forschungsreaktoren mit Leistungen von etwa 10 Kilowatt haben den Vorteil, sich bereits als Forschungsgerät zu eignen, ohne aber sehr aufwendig zu sein; sie bedürfen nur geringer Schutzmaßnahmen. Bei Forschungsreaktoren mit größerer Leistung kommt es nicht auf die erzeugte Wärmeenergie an; man ist im Gegenteil bestrebt, bei niedrigen Temperaturen zu arbeiten, weil man die Wärme als „lästige Beigabe" abführen muß. Eine wichtige Bedingung für einen For-

schungsreaktor ist ein starker Fluß von schnellen wie auch langsamen (thermischen) Neutronen. Der Neutronenfluß, auch Flux genannt, ist definiert als die Zahl der Neutronen, die in einer Sekunde durch eine Fläche von 1 cm^2 hindurchtritt; ein gebräuchlicher Fluß thermischer Neutronen in einem Forschungsreaktor hat die Größe von 10^{13} Neutronen pro cm^2 und sec (geschrieben: $10^{13}n/cm^2sec$). Die Neutronenflußdichten liegen bei normalen Forschungsreaktoren zwischen 10^{10} und $10^{13}n/cm^2$ sec. Die Forderungen nach hohem Neutronenfluß und geringer Leistung widersprechen sich, denn nur Reaktoren mit großen Leistungen haben einen hohen Neutronenfluß. Der Reaktorbauer muß einen Kompromiß suchen, besonders wenn er auch noch das Verlangen des Experimentators nach einem möglichst großen nutzbaren Reaktorvolumen erfüllen will, damit auch größere Objekte und Materialien der Neutronenstrahlung beim Experiment ausgesetzt werden können. Der Forschungsreaktor dient als intensive Neutronenquelle bei der Bestimmung von Wirkungsquerschnitten (Absorption, Streuung, Spaltung), von Bremslängen und Diffusionslängen von Neutronen in Materialien, die im Reaktorbau Verwendung finden. Der Ausbau der sogenannten Neutronenoptik, z. B. Untersuchungen über Neutronenbeugung, ist ohne Reaktor kaum denkbar, wie er auch als Hilfsmittel für die Festkörperphysik unentbehrlich ist. Nicht zuletzt müssen Untersuchungen über die chemischen und biologischen Wirkungen von Neutronen und anderen radioaktiven Strahlungen auf Materialien der verschiedensten Art erwähnt werden. Weiter werden mit der im Reaktor erzeugten Strahlung radioaktive Isotope in großem Umfang gewonnen. Zur Ausführung dieser Versuche werden durch die Abschirmung des Reaktors sogenannte Experimentierkanäle und Strahlrohre geführt, die den Neutronen- und den Gammastrahlen ungehindert Durchtritt gestatten.

Neutronenfluß

Reaktor als Experimentiergerät

Im Folgenden sollen Forschungsreaktoren kurz besprochen werden, die in der Bundesrepublik in Betrieb bzw. im Bau sind. Aus der Übersicht in Tabelle 9 (S. 23) ist zu ersehen, daß es sich um vier Typen handelt: den Water Boiler[8], den Swimming Pool[8], einen Reaktor (Dido[9]) auf der Basis angereicherten Urans und einen Reaktor (FR 2 Karlsruhe) auf der Basis natürlichen Urans, der mit schwerem Wasser als Moderator arbeitet.

Water Boiler

Der Water Boiler ist ein homogener Reaktor, dessen Herz (core) aus einem kugelförmigen Kessel aus rostfreiem Stahl von nur etwa 30 cm Durchmesser besteht. Er ist mit einer wäßrigen mit Uran 235 angereicherten Uransalzlösung gefüllt. Die erzeugte Wärme wird bei kleinen Typen durch Wasser abgeführt, das Kühlschlangen durchströmt. Die wäßrige Lösung ist zugleich Bremssubstanz (Moderator). Der Reaktorkessel ist von einem Graphitmantel umgeben, der als Neutronenreflektor wirkt. Homogene Reaktoren haben den Vorteil, daß keine Brennstoffelemente ausgewechselt zu werden brauchen. Die Brennstofflösung wird über ein Vorratsgefäß und ein Überlaufsystem in ihrer Menge jederzeit nicht nur reguliert, sondern auch erneuert. Die normale Betriebstemperatur des Water Boilers liegt bei einer Leistung von 50 kW bei 80° C. Er trägt also seinen Namen eigentlich zu Unrecht, da die Flüssigkeit gar nicht siedet. Diesen hat

[8] Die deutschen Bezeichnungen sind Wasserkocher- bzw. Schwimmbadreaktor.
[9] Dido bedeutet: D_2O = D–D–O, englisch ausgesprochen.

er durch das Geräusch erhalten, das die durch die radiolytische Zersetzung des Wassers entstehenden Gasblasen verursachen; es hört sich an, als ob die Flüssigkeit im Reaktor „kocht".
Im Fall der Überhitzung, d. h. also der Verdampfung der Uranlösung im Kessel, schlägt sich der Dampf im kühleren oberen Teil des Überlaufs nieder, bzw. es wird Reaktorflüssigkeit in den Überlauf übertreten. Durch die so bewirkte Verminderung der Menge der Uranlösung bleibt der Reaktor nicht kritisch, und die Gefahr der Überhitzung ist beseitigt. Im Kopfteil des Überlaufgefäßes sammeln sich oberhalb eines Filters die gasförmigen Spaltprodukte sowie der aus der Zersetzung des Wassers der Lösung entstehende Wasserstoff und Sauerstoff; die Gase werden durch einen ständig fließenden Sauerstoff-Strom in eine Gasbehandlungskammer mitgenommen und das explosive Wasserstoff-Sauerstoff-Gemisch durch dauernde Verdünnung mit zufließendem Sauerstoff unschädlich gemacht. Der Water-Boiler-Reaktor befindet sich in einem gasdicht abgeschlossenen Gebäude, dessen Innenraum ständig auf Unterdruck gehalten wird, um ein Austreten von möglicherweise radioaktiven Gasen zu verhindern.

Swimming Pool

Die Übersichtlichkeit seiner Anordnung macht den Swimming-Pool-Reaktor besonders geeignet für Untersuchungs- und Forschungszwecke. Der Öffentlichkeit wurde er durch die Genfer Atomkonferenz im Jahre 1955 bekannt. Die Forschungsreaktoren in München, Hamburg und einer der beiden in Nordrhein-Westfalen geplanten (MERLIN) sind Swimming-Pool-Reaktoren; auch der in der Nähe von Dresden im Betrieb befindliche Reaktor ist ein dem Swimming-Pool-Reaktor ähnlicher Tank-Reaktor. Sie sind alle heterogene Reaktoren; die Brennstoffelemente aus angereichertem Uran, umschlossen von einem Aluminiummantel, tauchen, an einer fahrbaren Brücke befestigt, in ein großes über sieben Meter tiefes Wasserbecken, das dem Reaktor seinen Namen gegeben hat.

Aufgabe des Wassers

Das Wasser übernimmt hier eine vierfache Funktion; es dient als Moderator, als Reflektor, als Kühlmittel und zugleich als Strahlenschutz. Für Swimming-Pool-Reaktoren, deren Leistung 100 kW nicht übersteigt, ist eine besondere Kühlanlage nicht notwendig; für größere Leistungen und hohen Neutronenfluß sind Wärmeaustauscher und ein besonderer Strahlenschutz nicht zu umgehen. Ein Strahlenschutz ist insbesondere gegen das im Wasser durch Neutronenstrahlung entstehende Stickstoffisotop ^{16}N erforderlich; dieser radioaktive Stickstoff hat allerdings eine Halbwertszeit von knapp 8 Sekunden, so daß das Wasser nach etwa zehnmal 8 Sekunden, also nach rund einer Minute, seine Radioaktivität praktisch wieder verloren hat. Man bringt deshalb das Kühlwasser, das durch den Reaktor hindurchgepumpt wurde, in einen ebenfalls strahlengeschirmten Tank und beläßt es dort etwa eine Viertelstunde. Das Wasser im „Swimming Pool" selbst bedarf der größten Reinheit; es muß destilliert und entmineralisiert sein, weil sonst die Gefahr besteht, daß gelöste oder suspendierte Verunreinigungen des Kühlwassers zur Bildung von radioaktiven Produkten führen. Beachtung verdient besonders die Bildung von radioaktivem Natrium 24, das eine Halbwertszeit von 15 Stunden besitzt.

Strahlenschutz

Die Schwierigkeiten eines wirksamen Strahlenschutzes liegen weniger in der technischen Durchführung der Schutzmaßnahmen als in der Unsicherheit über die Größe der Strahlendosis, die dem

Menschen zugemutet werden kann, ohne seine eigene Gesundheit oder die der nachfolgenden Generationen zu gefährden. Abgesehen von den Ergebnissen zahlreicher gründlicher Tierexperimente, deren Übertragung auf die Humanbiologie vielfach auf Bedenken stößt, liegen Erfahrungen über gesundheitliche Schäden nur bei Menschen vor, die jahrelang mit radioaktiven Stoffen arbeiteten oder die durch Katastrophen plötzlich von sehr starker Strahlung betroffen wurden. Diese Erfahrungen zeigen, daß die nachteiligen Wirkungen bei einmaliger sehr starker Bestrahlung größer und gefährlicher sind, als wenn dieselbe Strahlendosis durch langandauernde sich summierende Bestrahlung erreicht wird. Im letzten Fall besteht eine gewisse Möglichkeit der Erholung, wenn Pausen in die Bestrahlung eingeschaltet werden. Außer mit einer Sofortwirkung ist mit Spätschäden zu rechnen, die oft erst nach Jahren evident werden, und über die infolgedessen noch kein ausreichend umfangreiches Beobachtungsmaterial vorliegt. Die Internationale Kommission für Strahlenschutz rät, die Strahlendosis unter 0,1 Röntgen[10] pro Woche oder rund 5 Röntgen pro Jahr zu halten.

Strahlendosis

Tabelle 8:

Toleranzdosis für Personal eines Reaktorbetriebes

Alter	Pro **Woche**			Pro **Jahr**
	Betriebsrichtwert	Durchschnitt	gelegentliche stärkere Dosis	Jahresmaximum
20 - 30 Jahre	0,008 r	0,08 r	0,3 r	4 r
30 - 40 Jahre	0,01 r	0,1 r	0,3 r	4,7 r

Betriebsrichtwerte

Die für das Betriebspersonal als zulässig angesehene Strahlendosis für Ganzbestrahlungen gibt Tabelle 8. Die aufgeführte Dosis ist eine Höchstdosis, von der man annimmt, daß ihre Zulassung vertretbar ist, ohne damit zu behaupten, daß sie völlig unschädlich sei. Man hat deshalb für Reaktorbetriebe sogenannte „Betriebsrichtwerte" aufgestellt, die nur ein Zehntel der angegebenen Toleranzdosis betragen. Der Wochendurchschnitt, der nicht überschritten werden soll, beträgt danach für Personen zwischen 30 und 40 Jahren 0,01 r und für jüngere 0,008 r. Diesen Wert will man auch als Toleranzdosis für die in der Nähe eines Reaktors lebende Bevölkerung ansetzen. Erhält also das Reaktorpersonal höchstens eine Wochendosis von 0,008 r, dann kann die Bevölkerung auf unmittelbarem Wege ebenfalls keiner stärkeren Strahlung ausgesetzt sein.

[10] 1 Röntgen (r) ist die Einheit der Strahlendosis; die Dosis pro Zeiteinheit, also z.B. 0,1 r/Woche, nennt man Dosisleistung. Strenggenommen gilt die Einheit Röntgen nur für γ- und Röntgenstrahlen. α-Strahlen sind wegen der stärkeren spezifischen Ionisierungskraft biologisch 20mal so gefährlich wie die gleiche Dosis γ-Strahlen. Für die Beurteilung biologischer Wirkungen hat man deshalb das rem eingeführt (roentgen equivalent man). 1 rem α-Strahlen ist biologisch so gefährlich wie 1 r γ-Strahlen, aber physikalisch nur gleich 0,05 r γ-Strahlung. Schnelle Neutronen und Protonen ergeben den Faktor 10.

Radioaktive Abgase

Zwei Gefahrenquellen seien noch erwähnt: beim normalen Betrieb der Einfluß der Abgase und der Abwässer und ferner die Möglichkeit eines Reaktor-Unfalls. Radioaktive Abgase treten im normalen Betrieb nur in geringer Menge auf, es sei denn, daß Teile des Reaktors mit Luft gekühlt werden, die stärkerer Neutronenstrahlung ausgesetzt sind. Dabei entstehen gasförmige radioaktive Isotope, die nicht durch Filter zurückgehalten werden können, und zwar Sauerstoff 19, Stickstoff 16 und Argon 41. Die beiden ersten sind verhältnismäßig ungefährlich, da ^{19}O eine Halbwertszeit von 29 Sekunden und ^{16}N von nur 7,4 Sekunden hat, ihre Radioaktivität also sehr schnell wieder abklingt. Nur Argon 41 hat eine Halbwertszeit von fast zwei Stunden (1,82 h). Es ist schwer, Kühlluft, die in großer Menge anfällt und in der sich radioaktive Gase befinden, so lange vor jedem biologischen Kontakt zurückzuhalten. Bei jeder Anlage ist die Erzeugungsmöglichkeit von Argon zu prüfen bzw. durch geeignete technische Maßnahmen so weit wie möglich einzuschränken. Schließlich muß die Schornsteinhöhe entsprechend den meteorologischen Bedingungen und Bodenverhältnissen gewählt werden. Es ist z. B. zu prüfen, ob die Abgase bei möglichem Mikroklima nach Austritt aus dem Schornstein sehr bald zu Boden gedrückt werden können.

Radioaktive Abwässer

Besonderer Beachtung bedürfen die Abwässer eines Reaktors und der mit ihm verbundenen Laboratorien. Die Abwässer dürfen selbstverständlich nicht zur Beseitigung radioaktiver Abfälle dienen, aber auch das anfallende Kühlwasser muß sorgfältig überprüft werden. In dichtbevölkerten Gebieten werden völlig abgeschlossene Kühlsysteme die Regel sein, wie es bei den Forschungsreaktoren in der Bundesrepublik der Fall ist. Das ganze Abwasser-System muß so angelegt sein, daß nirgends ein unkontrollierter Abfluß von radioaktivem Wasser möglich ist.

„Durchgehen" eines Reaktors

Einen wichtigen Teil aller Sicherheitsmaßnahmen betreffen die Vorkehrungen beim Eintreten eines Betriebsunfalles. Alle Sicherheitsmaßnahmen haben davon auszugehen, daß eine solche Katastrophe eintreten kann, selbst wenn man sie für außerordentlich unwahrscheinlich hält. Die große Gefahr beim „Durchgehen" eines Reaktors liegt im Freiwerden radioaktiver Spaltprodukte. Die Mengen an Spaltprodukten („Atommüll"), die entstehen, sind so groß wie die Menge an Spaltstoffen, die verbraucht wurden. Als Faustregel kann gelten:
Bei einer Leistung von 1 Megawatt (1000 kW) wird pro Tag ein Gramm Uran 235 verbraucht.

Anfall an Atommüll

Die Spaltprodukte besitzen 100 Tage nach dem Entstehen je Gramm eine Radioaktivität von etwa 800 Curie. Ein Reaktor mit einer elektrischen Leistung von 100 Megawatt (100 000 kW) benötigt in einem Jahr etwa 40 kg Uran 235, erzeugt also auch ebensoviel Spaltprodukte. Es fällt danach bei der Aufbereitung der Brennstoffelemente eine Radioaktivität von etwa 30 Millionen Curie pro Jahr an, eine ungeheure Menge, wenn man bedenkt, daß auf der ganzen Welt keine zwei Kilogramm Radium aus Uranerzen gewonnen wurden.

Forschungsreaktorprogramm der Bundesrepublik
Stand: Anfang 1958

Standort	München (Garching)	Hamburg (Geesthacht)	Frankfurt (am Römerhof)
Entfernung v. nächstgelegenen Wohngebiet	2000 m	200 m	500 m
Reaktor-Typ	Schwimmbadreaktor (heterogen)	Schwimmbadreaktor (heterogen)	Wasserkocherreaktor (homogen)
Reaktorgebäude	Stahlbetonkuppel	Stahlbetonskelettbau mit gasdichter Stahlbetonkappe	Zylindrische Stahlkuppel
Forschungszweck	u. a. Neutronenphysik; Einwirkung von Strahlung auf Festkörper; Herstellung kurzlebiger Radioisotope; Aktivierungsanalysen	u. a. Abschirmungsuntersuchungen; Strahlungskorrosion an Brennstoffen, Moderatoren und Trägermaterialien	u. a. Neutronenphysik; Erzeugung von Radioisotopen
Wärmeleistung in kW	1000	5000	50
Thermischer Neutronenfluß (n/cm^2 · s)	ca. $6{,}6 \cdot 10^{12}$	ca. $2 \cdot 10^{13}$	ca. 10^{12}
Kühlmittel	leichtes Wasser	leichtes Wasser	leichtes Wasser
Moderator	leichtes Wasser	leichtes Wasser	leichtes Wasser
Kernbrennstoff	U 235 (5927 g) 20 % angereichert	U 235 (5,6 kg) 20 % angereichert Brenndauer: ca. 3 Mon.	U 235 (ca. 1,5 kg) ca. 20 % angereichertes Uranylsulfat in wäßriger Lösung Abbrand: ca. 5 g U 235/Jahr
Verbleib des gebrauchten Kernbrennstoffes	chemische Aufbereitung in den USA	chemische Aufbereitung in den USA	chemische Aufbereitung in den USA
Sicherheitseinrichtungen	geschlossener Primärkreislauf – Wärmetauscher – Sekundärkreislauf	geschlossener Primärkreislauf – Wärmetauscher – Sekundärkreislauf – Kühlturm	geschlossener Kühlkreislauf mit Kühlaggregat und Luftkühlung
Herstellerfirma	American Machine & Foundry Co.	Babcock & Wilcox	Atomics International Division der North American Aviation
Herstellerland	USA	USA	USA
Auftraggeber	Land Bayern	Ges. f. Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schiffahrt mbH, Hamburg	Farbwerke Hoechst als Stiftung f. Universität Frankfurt
Finanzierung	Land Bayern und Bund	Bund 33 1/3 %; Hamburg, Bremen, Schleswig-Holstein, Niedersachsen 33 1/3 %; Wirtschaft 33 1/3 %	Reaktor: Farbw. Hoechst Gebäude: Stadt Frankfurt Gerät: Bund
Kritisches Experiment	31. 10. 1957	Voraussichtl. Herbst 1958	10. 1. 1958

Tab. 9

Berlin (Wannsee)	Stetternich bei Jülich		Karlsruhe (Leopoldshafen)
500 m	800 m	800 m	3000 m
Wasserkocherreaktor (homogen)	Schwimmbadreaktor Merlin (heterogen)	Materialprüfreaktor Dido (heterogen)	Mehrzwecke-Forschungsreaktor FR 2 (heterogen)
gasdichte Betonhalle	gasdichtes, druckfestes Stahlhaus	gasdichtes, druckfestes Stahlhaus	Unterbau: Eisenbeton Oberbau: Stahlkuppel
u. a. Herstellung und Untersuchung von Radionukliden; Anwendung von Leitisotopen; Strahlungschemie	Neutronenphysik; Erzeugung von Radioisotopen; Materialuntersuchungen	Materialprüfung; Erzeugung von Radioisotopen hoher spezifischer Aktivität	Neutronenphysik, Entwicklung von Brennstoffelementen f. Leistungsreaktoren; Herstellung v. Radioisotopen
50	5000	10 000	10 000–12 000
ca. 10^{12}	ca. $4 \cdot 10^{13}$	ca. 10^{14}	ca. $3 \cdot 10^{13}$
leichtes Wasser	leichtes Wasser	schweres Wasser	schweres Wasser
leichtes Wasser	leichtes Wasser	schweres Wasser	schweres Wasser
U 235 (1,6 kg) ca. 20 % angereichertes Uranylsulfat in wäßriger Lösung Verbrauch: ca. 10 g U 235/Jahr	U 235 (6,9 kg) 90 % angereichert	U 235 ca. 90 % angereichert Wechsel der Brennstoffelemente alle 14 Tage je zur Hälfte	Natur-Uran (6 t) Thorium (1 t) Brenndauer: 2–3 Jahre
voraussichtlich Aufbereitung im Institut f. Kernforschung Berlin	Chemische Aufbereitung in England	Chemische Aufbereitung in England	Aufbereitung außerhalb der Reaktorstation Karlsruhe durch die deutsche Industrie
Zwei getrennte gasdichte Schutzhüllen im Reaktor; gasdichte Reaktorhalle als dritte Schutzhülle	Gasdichtes Stahlhaus, welches auch nach unten geschlossen ist, Personen- u. Wagenschleuse, Unterdruck im Behälter, geschlossener Primärkühlkreis, sorgfältige Kontrolle von Abwasser und Abluft	Gasdichtes Stahlhaus, welches auch nach unten geschlossen ist, Personen- u. Wagenschleuse, Unterdruck im Behälter, geschlossener Primärkühlkreis, sorgfältige Kontrolle von Abwasser und Abluft	geschlossener Primär- und Sekundärkühlkreis
Atomics International Division der North American Aviation	AEI-John Thompson Nuclear Energy Co., Knutsford/England	Head Wrightson Processes Ltd. London/England	Eigener Entwurf und Bau
USA	Großbritannien	Großbritannien	Bundesrepublik
Land Berlin	Land Nordrhein-Westfalen	Land Nordrhein-Westfalen	Kernreaktor Bau- und Betriebs-GmbH, Karlsruhe
Bund und Land Berlin	Je zu 50 % Bund und Land Nordrhein-Westfalen	Je zu 50 % Bund und Land Nordrhein-Westfalen	50 % Industrie 30 % Bund; 20 % Land Baden-Württemberg
Voraussichtl. Sommer 1958	Voraussichtl. 1959	Voraussichtl. 1959/60	Voraussichtl. 1959/60



Aufnahme: Bundesbildstelle Bonn

Prof. Dr. Heinz Maier-Leibnitz

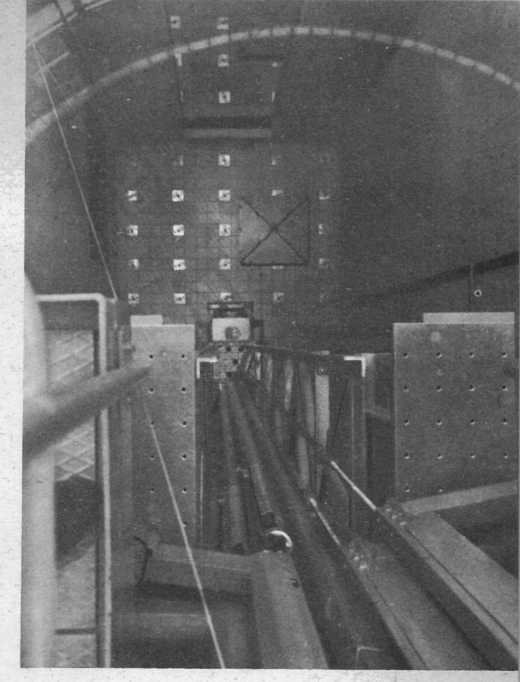
Unter seiner Leitung wurde am 31.10.1957 der erste Kernreaktor in Deutschland in Betrieb genommen. Geboren am 30.3.1911 in Eßlingen; studierte an der TH Stuttgart technische Physik und an der Universität Göttingen Physik und Mathematik; begann seine wissenschaftliche Laufbahn bei Prof. James Frank mit einer Experimentalarbeit über die Anregung von Edelgasen durch Elektronenstoß, die 1935 mit der Promotion abgeschlossen wurde; Mitarbeiter von Prof. Joos in Göttingen und von Prof. Bothe in Heidelberg; habilitierte sich 1942 nach der Entlassung aus dem Wehrdienst; nach dem Kriegsende eineinhalb Jahre beim Aero Medical Center und ein Jahr an der School of Aviation Medicine in den USA tätig; 1948 Abteilungsleiter am Max-Planck-Institut in Heidelberg und Dozent an der Universität Heidelberg; 1953 ordentlicher Professor für technische Physik und Vorstand des Laboratoriums für technische Physik der TH München; 1955 wurde er von der bayerischen Landesregierung mit der Projektierung des ersten deutschen Kernreaktors beauftragt.

Forschungsreaktor München

Der erste Kernreaktor, der in Deutschland in Betrieb genommen wurde, ist der am 31. 10. 1957 kritisch gewordene Forschungsreaktor des Laboratoriums für Technische Physik der Technischen Hochschule München in Garching. Dieser von der amerikanischen Firma American Machine & Foundry gelieferte Reaktor ist vom Typ swimming pool (= Schwimmbad-Reaktor) mit einer Wärmeleistung von 1 000 kW, der in Konstruktion und Verwendungszweck dem seit Ende Oktober 1956 beim Battelle Memorial Institute, Columbus, Ohio/USA, in Betrieb befindlichen Reaktor ähnlich ist.

Er wird mit leichtem Wasser moderiert und gekühlt. Das Wasser dient außerdem auch als Reflektor. Zur Abschirmung der Neutronen- und Gammastrahlung werden Wasser und Beton verwendet. Der Reaktorkern ist in Wasser versenkt, das sich in einem zweiteiligen Becken befindet. Der eine Teil ist das Betriebsbecken, der andere Teil, der durch ein bewegliches Aluminiumtor abgetrennt werden kann, ist für die Lagerung des Reaktorkerns vorgesehen, wenn Einrichtungen im Betriebsbecken repariert und geprüft werden müssen oder durch Versuchsanordnungen ergänzt werden sollen. Der Reaktor kann nur in Betriebsstellung im Betriebsbecken arbeiten.

Der Reaktorkern wird von einem Aluminiumturm getragen, der auf einer das Becken überspannenden beweglichen Brücke befestigt ist. Er besteht aus 28 Brennstoffelementen, die in einer Aluminiumgitterplatte stehen. Hierbei werden drei verschiedene Arten von Brennstoffelementen verwandt: 1. Standard-Brennstoffelemente, die aus je 12 Platten aus U Al 4 und Al-Legierung mit einem Gehalt von 178 g U-235 bestehen; 2. Spezial-Brennstoffelemente für eine feinere Abstufung der Reaktorladung, je zur Hälfte aus Brennstoff- und aus Aluminiumplatten bestehend; 3. Kontrollstab-Brennstoffelemente mit einem Führungskanal, in den die Kontrollstäbe, die zur Steuerung der Kettenreaktion dienen, eingeführt werden können.



Aufnahme: Bundesbildstelle Bonn

Blick von der Reaktorbrücke durch das Wasser des swimming pools auf den Reaktorkern

Das Kühlsystem besteht aus dem ersten Kühlkreis, in dem das leichte Wasser durch den Reaktorkern abwärtsströmt, über eine Rohrleitung durch einen Wärmeaustauscher im Pumpraum hindurchgeht und von einer Pumpe in das Reaktorbecken zurückgepumpt wird. Eine kleine Pumpe pumpt laufend einen kleinen Teil des Wassers aus dem Becken durch ein Filter und eine Entsalzungsanlage, in denen dem Wasser Schwebeteilchen und gelöste Salze entzogen werden. Auf diese Weise wird die Radioaktivität des Wassers beseitigt. Durch Metallwände im Wärmeaustauscher völlig vom ersten Kühlkreis getrennt ist der zweite Kühlkreis, in dem Brunnenwasser das Wasser des ersten Kühlkreises kühlt und anschließend durch ein großes Abflußbecken zur Isar fließt. Es ist Vorsorge getroffen, daß das in die Isar fließende Wasser keine radioaktiven Stoffe mit sich führt. Mit 4–5 Sicherheitsstäben aus Borkarbid und einem Regelstab aus nichtrostendem Stahl wird der Reaktor kontrolliert. Ein automatisches Kontrollsystem bewirkt, daß der Reaktor nur angeschaltet werden kann, wenn das Steuersystem richtig arbeitet. Ebenso schaltet sich der Reaktor automatisch ab, wenn gewisse Bedienungsfehler gemacht werden oder bestimmte technische Störungen eintreten.

Theoretisch sind es drei Gefahren, die beim Betrieb eines Reaktors auftreten können:

1. der Reaktor könnte außer Kontrolle geraten,
2. in der Nähe des Reaktorkerns besteht die Gefahr tödlicher Verbrennungen,
3. bei unvorsichtiger Handhabung können die beim Betrieb des Reaktors erzeugten radioaktiven Stoffe zu einer radioaktiven Verseuchung der Reaktorstation und ihrer Umgebung führen.

Diese drei Gefahren bestehen bei jedem Reaktor. Mit modernen technischen Hilfsmitteln können sie jedoch ausgeschaltet werden. Der Forschungsreaktor München ist so konstruiert und wird in einer Weise betrieben, daß gegen jede dieser Gefahren mehrfache Sicherheit besteht.

In der Reaktoranlage werden hauptsächlich folgende Forschungsarbeiten durchgeführt:

1. Kernphysikalische Untersuchungen mit langsamen und schnellen Neutronen
2. Untersuchungen über den Einfluß der Bestrahlung auf Materialien und Festkörper
3. Radiochemische Untersuchungen
4. Herstellung kurzlebiger radioaktiver Isotope



Aufnahme: Leni Dithmer, Hamburg

Prof. Dr. Erich Bagge

ist der wissenschaftliche Leiter der Reaktorstation in Hamburg-Geesthacht. 1912 in Neustadt bei Coburg geboren; Physikstudium in München und Berlin; 1938 Promotion bei Nobelpreisträger Prof. Dr. Heisenberg in Leipzig mit einer Arbeit zur Theorie der Kernkräfte; 1939 für Heereswaffenamt zur Nutzbarmachung der Kernenergie tätig; 1941 wissenschaftlicher Assistent am Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik in Berlin; nach Kriegsende ein Jahr in westalliierter Internierung; 1946 Assistent bei Heisenberg in Göttingen; 1948 außerordentlicher Professor für Physik an der Universität Hamburg; 1956 technisch-wissenschaftlicher Geschäftsführer der Gesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schiffahrt mbH in Hamburg; 1957 Direktor des Instituts für reine und angewandte Kernphysik in Kiel; bekanntgeworden durch Verfahren zur Isotopentrennung (Isotopenschleuse), Erforschung der kosmischen Ultrastrahlung und Entwicklung von Funkplattenzählern für Ultrastrahlenmessung.

Forschungsreaktor Hamburg

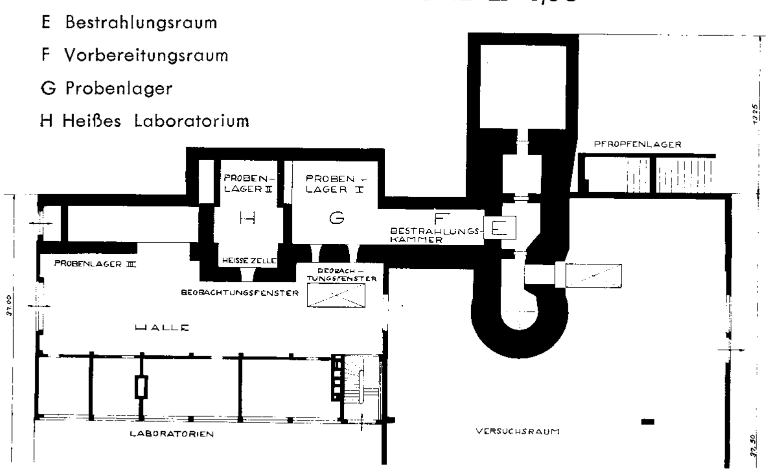
Die Energieerzeugung durch Kernspaltung ist nicht nur für stationäre Kraftwerke von Bedeutung, sondern im gleichen Maße auch für die Hochseeschiffahrt. Seit den von den USA durchgeführten und sehr erfolgreich verlaufenen Versuchen mit dem Atom-U-Boot „Nautilus" weiß man, daß ein Schiffsantrieb mit Kernenergie möglich ist, wenn auch bei dieser für militärische Zwecke gebauten ersten Antriebsanlage von Wirtschaftlichkeit noch keine Rede sein kann.

Schiffsreaktoren haben gegenüber herkömmlichen Antriebsanlagen den Vorteil, daß der Aktionsradius der damit ausgerüsteten Schiffe erheblich vergrößert und die Liegezeiten in den Häfen bedeutend verringert werden können. Der Kernbrennstoff benötigt sehr viel weniger Laderaum als z. B. Öl, und eine Übernahme von Brennstoff ist im Vergleich zu Schiffen mit herkömmlichen Antriebsanlagen nur in größeren Zeitabständen erforderlich.

Als daher Prof. Dr. Bagge, Dr. Kurt Diebner und Prof. Dr. Illies in Hamburg anregten, eine Studiengesellschaft zu gründen, die Forschung und Entwicklung an Reaktoren für Schiffahrtsantriebe zum Ziel haben sollte, fiel diese Anregung auf fruchtbaren Boden. Sie wurde vor allem von der Schiffbautechnischen Gesellschaft aufgegriffen.

So kam es am 29. Juni 1955 zur Gründung der Studiengesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffahrt und Industrie. Sie zählt heute zu ihren Mitgliedern den Bund, die vier norddeutschen Länder Bremen, Hamburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein sowie Wirtschafts- und Industriekreise, die mit der Schiffahrt eng verbunden sind: Werften, Reedereien, Zulieferindustrie, Erdölgesellschaften, Banken und Versicherungen, ferner eine große Zahl von Einzelmitgliedern. Nachdem durch die Veranstaltung von Vorträgen, die Herausgabe von Informationsblättern und Besprechungen mit den maßgebenden Stellen Interesse für die Aufnahme von Arbeiten zur Kernenergieverwertung im norddeutschen Raum geweckt worden war, wurde die Aufbringung

GRUNDRISS IN HÖHE ± 0,00



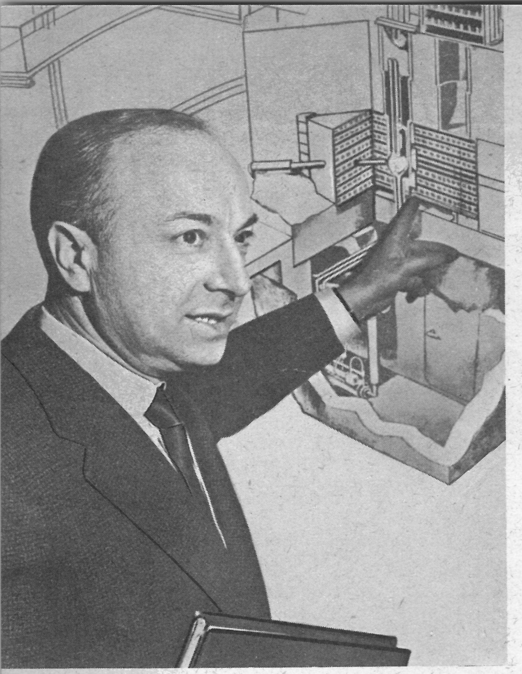
Zeichnung der Gesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schiffahrt mbH, Hamburg

Horizontalschnitt durch das Reaktorbecken des Forschungsreaktors in Geesthacht bei Hamburg

von Mitteln für eine Betriebsgesellschaft, der die wissenschaftliche und technische Schiffsreaktor-Entwicklung obliegen sollte, als Hauptaufgabe angesehen. Diese Bemühungen führten am 18. April 1956 zur Gründung einer Betriebsgesellschaft, der Gesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schiffahrt mbH mit Sitz in Hamburg. Gesellschafter sind neben dem Bund und den vier Küstenländern an der Schiffahrt interessierte Wirtschafts- und Finanzkreise.

Eine der ersten Maßnahmen dieser Gesellschaft war die Beschaffung eines Forschungsreaktors vom Schwimmbad-Typ von der amerikanischen Babcock & Wilcox Comp., New York, der in ähnlicher Ausführung bereits für die Universität Ann Arbor des Staates Michigan (USA) geliefert wurde. Dieser Forschungsreaktor soll dazu dienen, wissenschaftlichen und technischen Nachwuchs auszubilden sowie Vorversuche für spätere Schiffsreaktoren durchzuführen. Da in Deutschland nicht auf einen erfahrenen Stab von Wissenschaftlern und Technikern zurückgegriffen werden kann und uns die im Ausland gewonnenen Erkenntnisse nur teilweise zur Verfügung stehen, kann vorerst nicht mit der Entwicklung und dem Bau eines Schiffsreaktors nach deutschen Plänen begonnen werden.

Mit Rücksicht auf die besonderen Untersuchungen für Schiffsreaktoren, die mit diesem Reaktor durchgeführt werden sollen, hat sein Schwimmbadbecken zwei Besonderheiten. Zwischen dem Betriebs- und Lagerbecken ist ein zweites Betriebsbecken angeordnet, und hinter dem Lagerbecken befindet sich ein weiteres großes Versuchsbecken. Alle vier Becken stehen durch Schleusentore miteinander in Verbindung. Sie können alle gemeinsam oder auch jedes für sich benutzt werden. Das zweite Betriebsbecken hat ein großes „Bestrahlungsfenster", in das von außen her ein „Versuchswagen" hineingefahren werden kann. Auf diesem Wagen können Versuchseinrichtungen, vor allen Dingen für Abschirmungsuntersuchungen, aufgebaut und mit schnellen Neutronen beschossen werden. Diese Einrichtung dürfte für die ganze Welt neuartig sein. Das weitere große Versuchsbecken dient zur Aufnahme größerer bestrahlter Teile, die wegen ihrer Radioaktivität eine gewisse Zeit unter Wasser aufbewahrt werden müssen. Außerdem können hier besondere Versuche, z. B. Aufbau eines kritischen Experiments (Zweistufenreaktor), durchgeführt werden. Schließlich kann der abgestellte Reaktor hier als starke Gamma-Quelle für Bestrahlungen, z. B. für Lebensmittel, verwendet werden.



Aufnahme: Bundesbildstelle Bonn

Prof. Dr. Erwin Schopper

der Direktor des Instituts für Kernphysik der Universität Frankfurt ist verantwortlich für den Betrieb des am 10. 1. 1958 kritisch gewordenen Forschungsreaktors in Frankfurt am Main. Prof. Schopper wurde 1909 in Heilbronn geboren. Er studierte in Tübingen, Berlin, München und Stuttgart Mathematik und Physik. Als Assistent von Professor Regener beschäftigte er sich mit der Erforschung der kosmischen Strahlung. Seine Doktorarbeit schrieb er über Elementarteilchen. Bei IG Farben in Wolfen war er von 1937 bis Kriegsausbruch in der Industrieforschung tätig. Nach Wehrdienst und Verwundung arbeitete er mit seinem Lehrer Prof. Regener wieder auf dem Gebiet der Physik der Stratosphäre in Friedrichshafen am Bodensee. 1952 übernahm er die Leitung des Hochspannungslaboratoriums Hechingen der Max-Planck-Gesellschaft. Hier erreichte ihn 1956 der Ruf als Ordinarius für Kernphysik nach Frankfurt am Main.

Forschungsreaktor Frankfurt

Die Bedeutung der Kernphysik bringt es mit sich, daß alle Universitäten und Hochschulen bestrebt sein müssen, die elementaren Grundlagen der Kernphysik zu vermitteln, wofür Einrichtungen kleineren Umfanges überall notwendig sein werden. Eine weitergehende Ausbildung in Kernphysik, verbunden mit kernphysikalischer Forschungsarbeit, macht es jedoch notwendig, einzelne Universitäten mit größeren kernphysikalischen Instituten auszustatten. Das war auch der Anlaß für die Errichtung des Instituts für Kernphysik an der Universität Frankfurt.

Im Gegensatz zu den großen Forschungszentren, wie sie z. B. in Harwell (England), Saclay (Frankreich), Oak Ridge (USA) oder in Dubna (Sowjetunion) geschaffen wurden, muß ein Universitätsinstitut seine Forschungsarbeit auf ein bestimmtes Teilgebiet beschränken, für das aber soviel Apparate vorhanden sein müssen, daß damit eine möglichst geschlossene Bearbeitung des gewählten Forschungsgebietes gewährleistet ist.

Das Institut für Kernphysik der Universität Frankfurt wird sich hauptsächlich mit Neutronenphysik beschäftigen. Hierfür stellt der von den Vereinigten Staaten gelieferte Forschungsreaktor als Neutronenquelle ein wesentliches Arbeitsinstrument dar. Zur Vervollständigung der apparativen Ausstattung für die Neutronenphysik gehören noch zwei Teilchenbeschleuniger, ein 1,5-Me-V-Kaskadenbeschleuniger und ein 6-Me-V-Drucktank-van-de-Graaff-Beschleuniger mit den zugehörigen kernphysikalischen Einrichtungen. Außer Neutronenphysik stehen auf dem Arbeitsprogramm des Instituts für die Reaktorabteilung: Reaktorphysik, Isotopenphysik einschließlich der Herstellung kurzlebiger radioaktiver Isotope, Strahlenbiophysik und Strahlenschutzmaßnahmen zusammen mit dem Max-Planck-Institut für Biophysik in Frankfurt, Reaktorpraktika für Physiker, Reaktoreinführungskurse, auch für Angehörige anderer Fakultäten, und Chemie radioaktiver Substanzen zusammen mit dem radiochemischen Laboratorium der Farbwerke Hoechst.



Aufnahme: Bundesbildstelle Bonn

Am Schaltpult des Forschungsreaktors Frankfurt

Der Reaktorbetrieb wird von vier Wissenschaftlern geleitet, und zwar von zwei Physikern (einem Technischen und einem Wissenschaftlichen Leiter) und zwei Sicherheitsbeauftragten (einem Biophysiker als Strahlenschutzbeauftragtem und einem Supervisor für Sicherheitseinrichtungen). Dem Technischen Leiter stehen Fachschulingenieure für die Bedienung des Reaktors zur Verfügung. Die Sicherheitsbeauftragten haben das Recht, im Ermessensfalle die Arbeiten am Reaktor teilweise oder vollständig zu unterbrechen.

Der von den Farbwerken Hoechst gestiftete und mit Bundes-, Landes- und städtischen Mitteln errichtete Reaktor ist ein homogener Lösungsreaktor („Water Boiler" = Wasserkocher) vom Typ L-54 der Atomics International Division der North American Aviation, Calif./USA, mit einer Wärmeleistung von 50 kW. Der Kernbrennstoff besteht aus einer Lösung von auf 20% U-235 angereichertem Uranylsulfat in leichtem Wasser. Die Kühlung des Reaktors erfolgt durch Wasser in drei Kühlkreisen. Zur Abführung des Wassers wird im ersten Kühlkreis destilliertes Wasser und im zweiten Kühlkreis, der mit dem ersten Kühlkreis durch einen Wärmeaustauscher verbunden ist, gewöhnliches Wasser benutzt. Der dritte Kühlkreislauf führt ohne direkten Anschluß an das Wassernetz die Wärme über ein Kühlaggregat an die Außenluft ab. Über die von der amerikanischen Lieferfirma und von der Atomenergiekommission der Vereinigten Staaten vorgesehenen Sicherheitsmaßnahmen hinaus wurde die Reaktorhalle als Stahlkonstruktion zusammen mit dem Fundament gasdicht ausgeführt, so daß der Reaktor statt der zwei üblichen drei gasdichte Hüllen besitzt. Besondere Aufmerksamkeit wurde auch der Sicherung gegen ein Austreten radioaktiven Wassers gewidmet. Das Reaktorgebäude und das radiochemische Labor haben keine Verbindung zum städtischen Abwassersystem. Abwässer werden in Behältern aufgefangen, kontrolliert und, wenn es nötig ist, aufgearbeitet. Erst nach Freigabe durch die Sicherheitsbeauftragten werden sie dem Abwassersystem zugeführt.



Aufnahme:
Landesbildstelle Berlin

Prof. Dr. Karl-Erik Zimen

Ihm untersteht die kernchemische Abteilung des „Instituts für Kernforschung Berlin" und damit der Forschungsreaktor der Freien und Technischen Universität Berlin in Wannsee. — Geboren am 5. 2. 1912 als schwedischer Staatsangehöriger in Berlin; Vater Schwede, Mutter Deutsche; 1931 bis 1935 Chemiestudium an der Universität Berlin; 1935-1939 Dissertationsarbeit und Assistent am Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie, Berlin-Dahlem; 1937 Dr. phil. an der Universität Berlin; 1942 Dr. phil. habil. an der TH Darmstadt; 1946 Dozent für angewandte Kernchemie an der TH Göteborg/Schweden; 1946-1956 Direktor des von der Schwedischen Atomkommission betriebenen Instituts für Kernchemie, Göteborg; 1957 Ordinarius für Kernchemie an der TU Berlin und Direktor des Instituts für Kernforschung Berlin, Sektor Kernchemie.

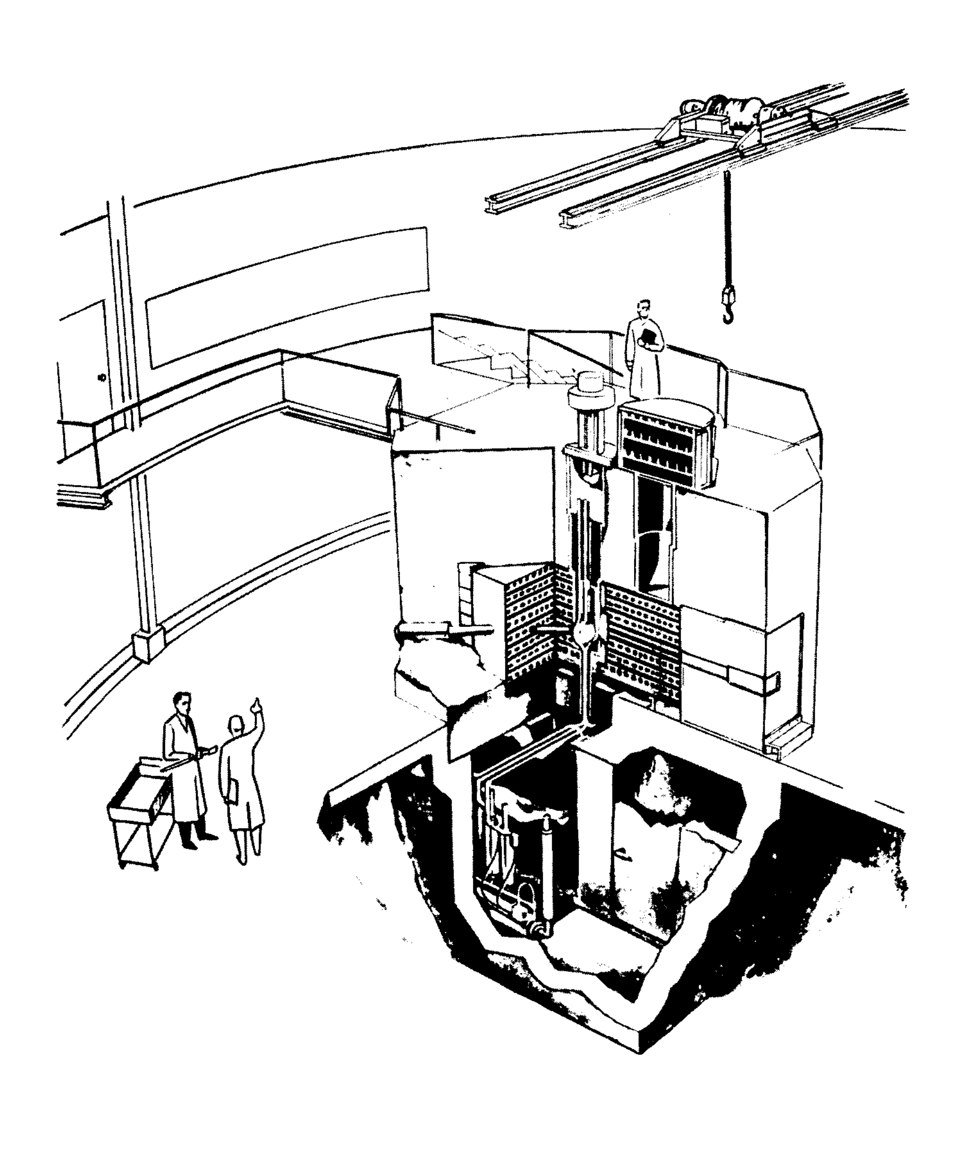
Forschungsreaktor Berlin

Im Januar 1956 forderten zahlreiche Berliner Professoren in einer Denkschrift die Errichtung eines zentralen Atomforschungsinstituts, um auch der wissenschaftlichen Forschung und Lehre in Westberlin den Anschluß an die internationale Entwicklung zu sichern. Gleichzeitig herrschte in interessierten Wirtschaftskreisen die Ansicht, daß es bei der in Westberlin ansässigen und für die Viersektorenstadt äußerst wichtigen feinmechanischen und Elektro-Industrie nötig sei, auch in der ehemaligen Reichshauptstadt eine Ausbildungsmöglichkeit für Fachkräfte auf dem Gebiet der Kerntechnik zu schaffen. Alsbald befaßten sich Senat und Abgeordnetenhaus mit diesen Plänen. Nach eingehenden Beratungen beschlossen sie, das Institut für Kernforschung Berlin (IKB) zu gründen, das der Freien Universität (FU), der Technischen Universität (TU) und der interessierten Berliner Industrie zur Verfügung stehen soll. Das gemeinsame Institut besteht aus zwei Abteilungen, einem Institut für Kernchemie, das an die TU angeschlossen ist, und einem Institut für Kernphysik, das der FU angeschlossen ist.

Für das unter Leitung von Prof. Zimen stehende Institut für Kernchemie beschaffte der Berliner Senat von der Atomics International Division der North American Aviation in den USA einen Forschungsreaktor, der dem am 10. 1. 1958 in Betrieb genommenen Forschungsreaktor des Instituts für Kernphysik der Universität Frankfurt entspricht. Als Standort wurde ein 90 000 qm großes Gelände im Glienicker Park in Wannsee neben dem Golfklub Wannsee ausgewählt. Mit der Planung und Bauausführung ist eine Arbeitsgemeinschaft von vier großen Industriefirmen betraut. Innerhalb der Arbeitsgemeinschaft übernahm die AEG die Bautechnik, Borsig Heizung und Lüftung, Pintsch-Bamag die Reaktorinstallation, den maschinentechnischen Teil und die Sicherungsanlagen und Siemens die elektrischen Einrichtungen.

Voraussetzung für die Aufnahme der Kernforschung einschließlich des Betriebes eines Forschungsreaktors in Berlin war die Genehmigung durch die Alliierte Kommandantur der drei Westsektoren. Sie wurde im Januar 1957 erteilt. Auf dieser rechtlichen Grundlage konnte am 28. Juni 1957 zwischen der Bundesrepublik und den USA das besondere Atomabkommen zugunsten Berlins abgeschlossen werden, das die Lieferung des Forschungsreaktors und des zu seinem Betrieb erforderlichen Kernbrennstoffs aus den USA ermöglichte.

Der Grundstein für das Institut für Kernforschung wurde am 25. Mai 1957 gelegt. Die Bauarbeiten sind inzwischen so weit fortgeschritten, daß das IKB in diesem Sommer seinen Betrieb aufnehmen kann.



Zeichnung: Atomics International Division

Schnitt durch den Forschungsreaktor des Instituts für Kernforschung, Berlin (IKB)



Aufnahme: Landesbildstelle Düsseldorf

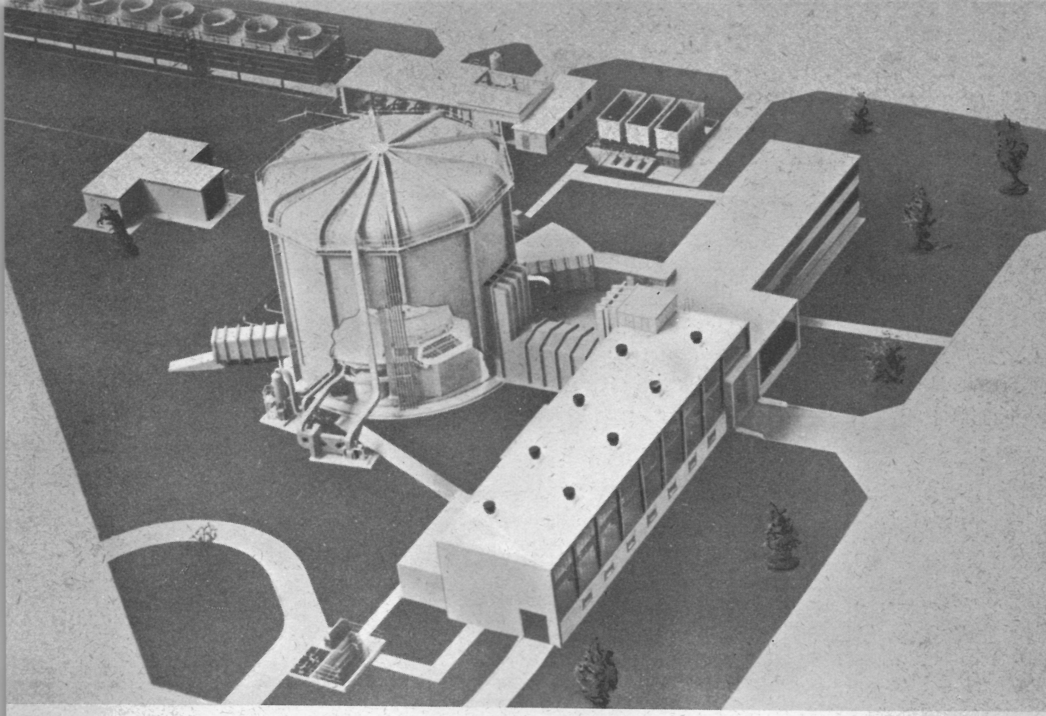
Prof. Dr. med. h. c.
Dipl.-Ing. Leo Brandt

Seit er im Ministerium für Wirtschaft und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen tätig ist, hat er unablässig und überall eine stärkere Förderung der Forschung im allgemeinen und der Atomforschung im besonderen verlangt und auch durchgesetzt. Von ihm stammt auch die Idee für die Errichtung einer gemeinsamen Atomforschungsanlage für das Land Nordrhein-Westfalen. – Geboren am 17. 11. 1908 in Bernburg/Anhalt; studierte 1927-1929 in Aachen und Berlin Fernmeldetechnik, legte 1932 an der TH Berlin-Charlottenburg die Diplomprüfung ab und trat bei Telefunken ein; 1938 dort Leiter der Geräteentwicklung; 1943 Entwicklungsgruppenleiter des „Generalbevollmächtigten für die technischen Nachrichtenmittel"; 1946 Vorstandsmitglied und 1948 Generaldirektor der Rhein. Bahngesellschaft AG in Düsseldorf; 1949 Ministerialdirektor und 1953 Staatssekretär im Ministerium für Wirtschaft und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen.

Gemeinsame Atomforschungsanlagen des Landes Nordrhein-Westfalen

Das Land Nordrhein-Westfalen ist dabei, für die Universitäten Bonn, Köln und Münster, die TH Aachen und die Medizinische Akademie Düsseldorf im Stettenicher Forst bei Jülich gemeinsame Atomforschungsanlagen zu errichten. Die Errichtung dieser zentralen Atomforschungsstätte erfolgt auf Grund eines von den Fraktionen der CDU, SPD, FDP und des Zentrums im Dezember 1956 einstimmig gefaßten Landtagsbeschlusses. Maßgeblich für diesen Beschluß waren finanzielle, sicherheitstechnische und organisatorische Gründe. Diese gemeinsamen Anlagen werden auch der Industrie für Forschungs-, Prüfungs- und Entwicklungsarbeiten zur Verfügung stehen. Auf diese Weise soll erreicht werden, daß sich die Grundlagenforschung und die angewandte Forschung möglichst stark befruchten, daß die Wissenschaft stärker als bisher mit den Problemen der Technik und umgekehrt die Technik mehr als bisher mit den Fragestellungen der modernen Naturwissenschaft in Berührung kommt. Oberstes Prinzip bleibt jedoch die Freiheit von Forschung und Lehre, d. h. jeder verantwortliche Wissenschaftler kann sich den Forschungsaufgaben widmen, die er zu bearbeiten wünscht.

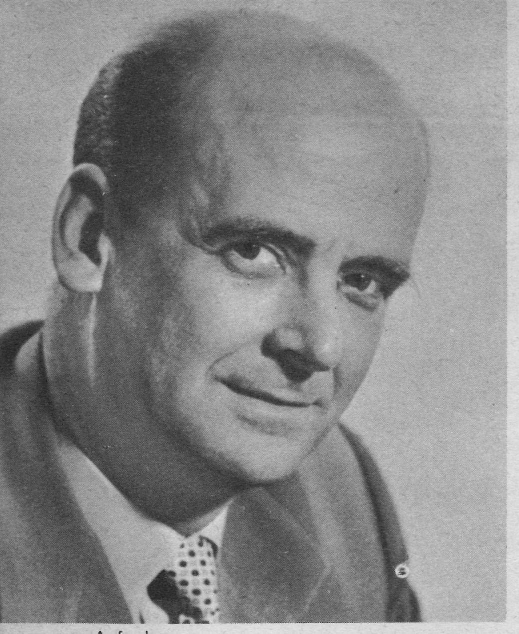
Die gemeinsamen Atomforschungsanlagen des Landes Nordrhein-Westfalen sind das Ergebnis einer überaus glücklichen Zusammenarbeit der einzelnen Länderministerien mit dem Landtag, der Arbeitsgemeinschaft Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen, in der namhafte Wissenschaftler an der Gesamtplanung mitwirken, und dem Bundesministerium für Atomkernenergie und Wasserwirtschaft. Von den Gesamtkosten in Höhe von 102,5 Mio DM soll der Bund 40 Mio DM und das Land 62,5 Mio DM übernehmen. Das Land errichtet als Bauherr die vorgesehenen Anlagen. Es bedient sich für die Planung und den späteren Betrieb der Mitwirkung der Gesellschaft zur Förderung der kernphysikalischen Forschung in Düsseldorf, eines eingetragenen Ver-



Aufnahme: Ministerium für Wirtschaft und Verkehr NRW

Modell der Dido-Reaktoranlage in Harwell/England

eins auf gemeinnütziger Grundlage, der schon bei der Errichtung des Bonner Zyklotrons tätig war.
Es liegt im Sinne der Universalität, daß die Forschungsanlagen mit Instituten der verschiedenen Fachrichtungen ausgestattet werden. Zunächst sind neben den zwei von England gelieferten Forschungsreaktoren MERLIN und DIDO 12 Institute mit ihren Nebenanlagen vorgesehen. Bei den beiden Reaktoren handelt es sich:
1. um einen Schwimmbad-Forschungsreaktor des Typs MERLIN der englischen Firma A.E.J.-John Thompson Nuclear Energy Company Limited, Knutsford. MERLIN ist die Abkürzung für **M**edium **E**nergy **R**esearch **L**ight Moderated **I**ndustrial **N**uclear Reactor = Mittlerer Energie-Forschungs-, Leicht-Wasser moderierter Industrie-Kern-Reaktor. Dieser Reaktor hat bei einer maximalen Wärmeleistung von 5000 kW einen thermischen Neutronenfluß von $4 \cdot 10^{13}$ n/cm² · sec. Die Brennstoffelemente, für die eine Legierung aus Uran und Aluminium verwendet wird, bestehen zu 90 % aus Uran-235. Die kritische Masse des Reaktorkerns beträgt etwa 6,9 kg Uran-235. Leichtes Wasser dient hier zugleich als Moderator, Kühlung und Abschirmung.
2. um einen Materialprüfreaktor des Typs DIDO der englischen Firma Head Wrightson Processes Limited, London. DIDO ist die Abkürzung für D_2O = DDO und bezeichnet einen Schwerwasserreaktor. Der Reaktor arbeitet mit hoch angereichertem Uran als Brennstoff und Schwerem Wasser als Moderator, das gleichzeitig als Kühlmittel und Reflektor dient. Der Neutronenfluß beträgt 10^{14}n/cm² · sec., die Wärmeleistung 10 000 kW. Der Reaktor DIDO ist in erster Linie dazu bestimmt, das Verhalten von Reaktorwerkstoffen im Strahlenfeld zu untersuchen. Zweck dieser Untersuchungen ist es, geeignete Bau- und Werkstoffe für Leistungsreaktoren zu entwickeln. Die Zukunft der deutschen Reaktortechnik hängt entscheidend von der Schaffung solcher Experimentiermöglichkeiten ab.



Aufnahme:
Kernreaktor Bau- und Betriebs-GmbH, Karlsruhe

Prof. Dr. Karl Wirtz

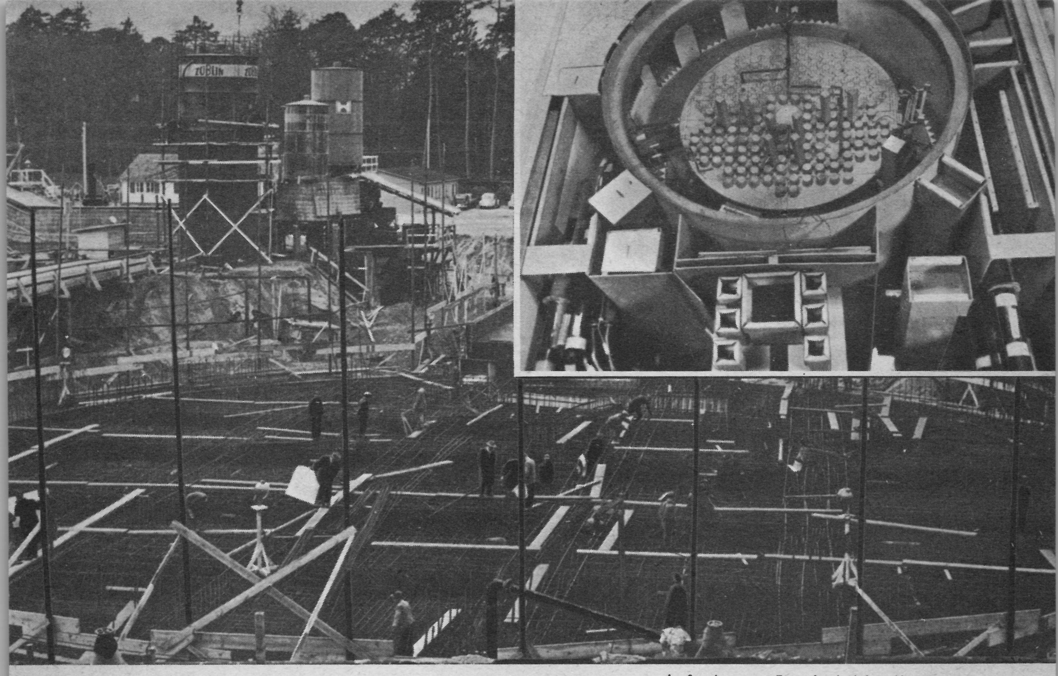
leitet die Planungsarbeiten für den nach deutschen Plänen entstehenden Forschungsreaktor in Karlsruhe. Geboren 24.4.1910 in Köln; studierte Physik, Mathematik und Chemie an den Universitäten in Bonn, Freiburg und Breslau; Doktor- und Staatsexamen für das höhere Lehrfach; 1937 Assistent und 1944 Abteilungsleiter für Physik am Kaiser-Wilhelm-Institut in Berlin; 1938 Habilitation an der Universität Berlin; Arbeiten vor allem in Atom- und Molekularphysik; während des Krieges Teilnahme an den Arbeiten zur Ingangsetzung einer kontrollierten Kernspaltungsreaktion bis zum Bau eines Atommeilers im Felsenkeller von Haigerloch; 1948 außerplanmäßiger Professor für Physik in Göttingen; 1957 ordentlicher Professor für physikalische Grundlagen der Reaktortechnik an der TH Karlsruhe und Leiter des Instituts für Neutronenphysik und Reaktortechnik der Kernreaktor Bau- und Betriebs-GmbH Karlsruhe.

Reaktorstation Karlsruhe

In der Reaktorstation Karlsruhe wird ein Reaktor deutscher Konstruktion errichtet. Zu diesem Zweck wurde am 19. Juli 1956 in Karlsruhe die gemeinnützige Kernreaktor Bau- und Betriebs-GmbH gegründet, an der der Bund mit 30 %, das Land Baden-Württemberg mit 20% und etwa 80 in der Kernreaktor Finanzierungs-GmbH vereinigte Gesellschaften der Industrie mit 50 % des Stammkapitals von jetzt 40 Mio DM beteiligt sind. Bei diesem Zusammenschluß gingen Politiker, Wissenschaftler und Wirtschaftler davon aus, daß die deutsche Industrie zur Erhaltung ihrer Wettbewerbsfähigkeit im In- und Ausland in die Lage versetzt werden muß, Forschungs- und Leistungsreaktoren selbst bauen zu können. Deutschland besitzt trotz seines Rückstandes gegenüber führenden Atomländern wie den Vereinigten Staaten von Nordamerika, Großbritannien, Frankreich, Kanada und der Sowjetunion gute Voraussetzungen für eine erfolgversprechende Forschungs- und Entwicklungsarbeit in der Kerntechnik. Diese Voraussetzungen sind gegeben durch die hohe Leistungsfähigkeit der für die Anwendung der Reaktortechnik in erster Linie in Frage kommenden Gebiete Elektroindustrie, chemische Industrie, Metallurgie und Maschinenbau.

Alle Beteiligten waren sich von Anfang an darüber klar, daß für die ganz nach deutschen Plänen zu errichtende Reaktorstation Karlsruhe ein besonders ausgewählter Stab von Mitarbeitern gefunden werden mußte. An die Seite des Physikers mußten der Konstrukteur und Ingenieur treten, um das theoretisch vorbereitete Projekt baureif zu machen und auszuführen. Wissenschaftler und Techniker verschiedener Fachrichtungen mußten zu einer geschlossenen Arbeitsgemeinschaft zusammengefaßt werden. Heute besteht diese Arbeitsgemeinschaft aus rund 300 Mitarbeitern, von denen etwa 50 Delegierte aus der Industrie sind, die von ihren Stammfirmen befristet zur Verfügung gestellt wurden und nach Erfüllung ihrer Aufgaben bei der Reaktorgesellschaft in ihre Mutterwerke zurückkehren.

Alle mit dem Reaktor in Zusammenhang stehenden Fragen werden mit einem wissenschaftlich-technischen Gremium besprochen, das von Zeit zu Zeit, teilweise in



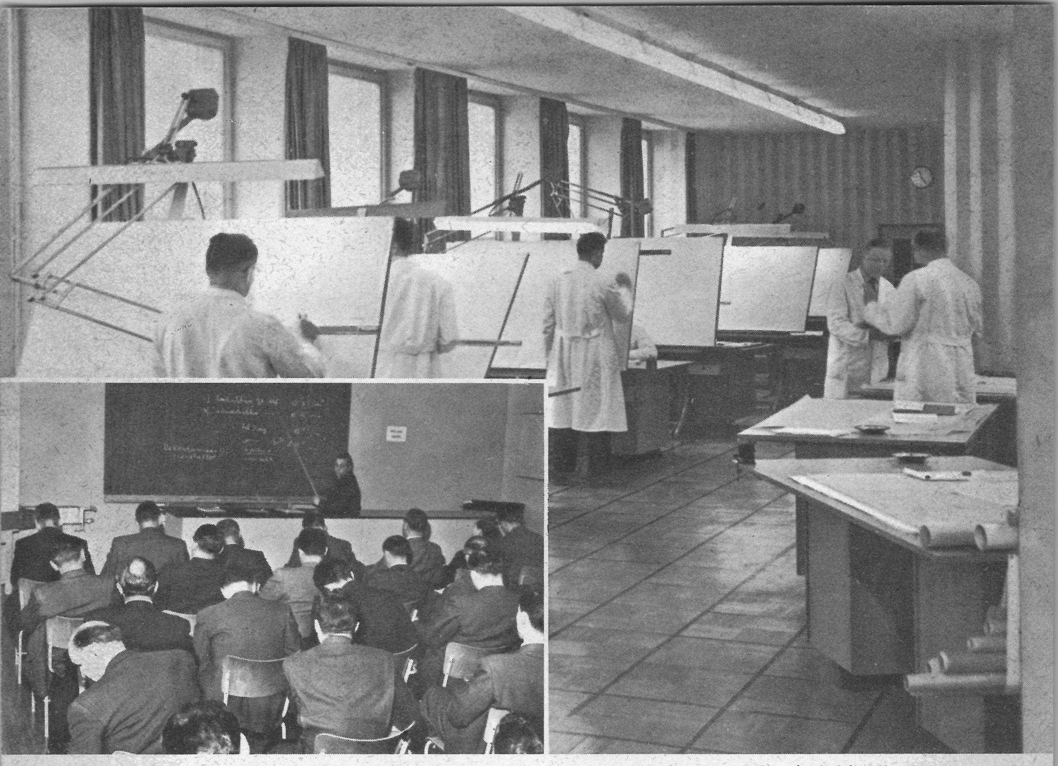
Aufnahmen: Bundesbildstelle Bonn

Aus der Baugrube wächst das Reaktorgebäude für den Reaktor deutscher Konstruktion und Fabrikation

verschiedener Zusammensetzung, einberufen wird. Auf diese Weise ergab sich eine bisher wohl einmalige Zusammenarbeit von Wissenschaft und Technik in Deutschland, die der Planung und Konstruktion des Karlsruher Forschungsreaktors in außergewöhnlichem Maße zugute gekommen ist. Der Reaktor ist so ausgelegt, daß später Wissenschaft und Industrie die ihr wünschenswert erscheinenden Versuche an ihm in vollem Umfang durchführen können.
Der Reaktor, der die Bezeichnung FR 2 führt, soll nur Strahlung erzeugen, nicht technisch verwertbare Energie. Er verwendet natürliches Uran in Form von metallischen Stäben als Brennstoff und Schweres Wasser als Moderator und Kühlmittel. Außerdem ist die zusätzliche Verwendung von Thoriumstäben geplant. Die Gründe für die Wahl dieses Reaktortyps waren folgende:

> Als Brennstoff mußte natürliches Uran verwendet werden, da Deutschland keine Isotopentrennanlage zur Erzeugung von angereichertem Uran besitzt.
> Die gewünschte große Dichte der Strahlung im Innern des Reaktors läßt sich bei Natururanreaktoren am besten mit Schwerem Wasser als Moderator erreichen, das beim FR 2 im Unterschied zu Reaktoren ähnlicher Bauart gleichzeitig zur Kühlung benutzt wird.

Die Entwicklung des Reaktors FR 2 soll dazu dienen, an einer verhältnismäßig einfachen Reaktortype eigene Erfahrungen im Bau und Betrieb eines Reaktors zu sammeln und eine mit diesen Erfahrungen vertraute Gruppe von Physikern und Ingenieuren für später in Deutschland zu entwickelnde Forschungs- und Leistungs-



Aufnahmen: Bundesbildstelle Bonn

Teilnehmer an einem Reaktorlehrgang für die Industrie – Blick in das Konstruktionsbüro

reaktoren heranzuziehen. Der Karlsruher Reaktor soll daher die Grundlage für die Entwicklung neuer Reaktoren bzw. neuer Reaktorteile, vor allem von Brennstoffelementen, bilden. Er ist so ausgelegt, daß in ihm Brennstoffelemente geprüft, Strahlungsversuche aller Art durchgeführt und Untersuchungen über das Verhalten des Reaktors selbst ausgeführt werden können. Seine Neutronenstrahlung kann dazu verwendet werden, um radioaktive Isotope für wissenschaftliche, industrielle und medizinische Zwecke herzustellen.

Zum Standort des Reaktors wurde ein 1,4 qkm großes Gelände in dem etwa 10 km nördlich von Karlsruhe gelegenen Hardtwald gewählt. Dieser Standort ist bautechnisch günstig, da er hochwassersicher ist und einen sehr guten Baugrund hat. Lage und Beschaffenheit des Reaktorgeländes erfüllen in hohem Maße die Forderungen, die an ein Reaktorgelände aus Sicherheitsgründen gestellt werden. Auch unter Berücksichtigung von meteorologischen Gesichtspunkten ist der gewählte Standort als geeignet anzusehen.

Ein Überblick über die Reaktorstation zeigt, daß das Gelände in drei Zonen eingeteilt ist. Das sog. heiße Gelände umfaßt den Reaktor, Laboratorien, in denen mit offenen Präparaten gearbeitet wird, und eine Fläche, die für Abwasserbeseitigung, Entaktivierung und Lagerung radioaktiver Abfallprodukte vorgesehen ist. Südlich dieses Abschnitts folgt ein Streifen, den man als „warmes Gelände" bezeichnet. Hier sind physikalische und radiochemische Institute vorgesehen, in denen mit schwachen Aktivitäten gearbeitet wird. Südlich hiervon liegt das



Aufnahmen: Bundesbildstelle Bonn

Zur Nullpegelfeststellung der Radioaktivität dient ein Meßwagen, mit dem regelmäßig Messungen in einem Umkreis von 75 km um die Reaktorstation durchgeführt werden

sog. kalte Gelände, in dem die übrigen Institute, Werkstätten und sonstigen allgemeinen Anlagen ihren Platz finden sollen.
Der Baugenehmigungsbescheid, der am 6. April 1957 vom Landrat des Landkreises Karlsruhe erteilt wurde, enthält u. a. die Auflage, daß die Kernreaktor Bau- und Betriebs-GmbH auf ihre Kosten einen Sicherheitsbeauftragten zu bestellen hat, dem gegenüber der Geschäftsführung das Vetorecht in Fragen der Arbeitssicherheit zusteht. Der Sicherheitsbeauftragte hat über das Ergebnis der Sicherheitsüberprüfungen und über den Stand der getroffenen Schutzvorkehrungen jederzeit Auskunft zu erteilen. Dem inzwischen bestellten Sicherheitsbeauftragten steht u. a. zur Durchführung seiner Aufgaben eine besondere Strahlenschutzabteilung zur Verfügung, in der ein Arzt für den medizinischen Strahlenschutz, ein Physiker für die Strahlenmeßgruppe und ein Chemiker für die Dekontaminationsgruppe verantwortlich tätig sind. Der Sicherheitsbeauftragte verfügt über einen besonderen Entaktivierungstrupp zur Beseitigung größerer radioaktiver Verunreinigungen, über Strahlenschutz-Überwachungspersonen und Sicherungstrupps in besonderen Gefahrenfällen.
Die Strahlenmeßgruppe führt seit langer Zeit Arbeiten zur Nullpegel-Feststellung der derzeitigen Radioaktivität in der Luft, im Boden, im Grund- und Oberflächenwasser, Trinkwasser und in Pflanzen in einem Umkreis von 75 km um die Reaktorstation durch. Diese laufenden und vorsorglichen Messungen sind notwendig, um nach Inbetriebnahme des Karlsruher Reaktors überhaupt mit Sicherheit feststellen zu können, ob und inwieweit eine zusätzliche Radioaktivität durch den Reaktorbetrieb verursacht wird.



Aufnahme: Sandau, Beuel

Prof. Dr.-Ing. Siegfried Balke

Bundesminister für Atomkernenergie und Wasserwirtschaft

Unter seiner Leitung entstand das 500 000-kW-Programm zur Entwicklung von Leistungsreaktoren in der Bundesrepublik.

Industrielles Kernenergieprogramm

In enger Zusammenarbeit mit der Deutschen Atomkommission wurde vom Bundesministerium für Atomkernenergie und Wasserwirtschaft ein industrielles Kernenergieprogramm aufgestellt. Das Kernstück des Programms bildet die Entwicklung von Leistungsreaktoren nach deutschen Plänen. Sie sollen zur Erzeugung von elektrischer Energie dienen. Es ist beabsichtigt, bis zum Jahre 1965 vier bis fünf Versuchskraftwerke von etwa je 100 000 kW elektrischer Leistung mit einer Gesamtkapazität von 500 000 kW zu erstellen. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeit an diesen Versuchsreaktoren, die als Vorstufen für spätere Leistungsreaktoren erforderlich sind, wurde inzwischen von folgenden Reaktorentwicklungsgruppen der deutschen Industrie aufgenommen:

1. Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft AG (AEG), Frankfurt (Main)
2. Deutsche Babcock & Wilcox Dampfkessel-Werke AG, Oberhausen/Rheinland
3. Firmengemeinschaft Brown, Boveri & Cie, Mannheim, und Friedrich Krupp, Essen
4. Interatom GmbH, eine Gemeinschaftsgründung der Demag, Duisburg, und der North American Aviation (USA)
5. Siemens-Schuckert-Werke AG (SSW), Erlangen

Interesse am Bau und Betrieb von Kernkraftwerken haben innerhalb der deutschen Elektrizitätswirtschaft folgende Energieversorgungsunternehmen:

1. Arbeitsgemeinschaft Baden-Württemberg zum Studium der Errichtung eines Kernkraftwerkes, Stuttgart
2. Arbeitsgemeinschaft Deutscher Energieversorgungsunternehmen zur Vorbereitung der Errichtung eines Leistungs-Versuchsreaktors e. V. (AVR), Düsseldorf
3. Gesellschaft für die Entwicklung der Atomkraft in Bayern mbH, München
4. Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk AG (RWE), Essen
5. Studiengesellschaft für Kernkraftwerke GmbH (SKW), Hannover

Der Materialbedarf für das 500 000-kW-Programm beträgt nach den Schätzungen der Sachverständigen:

400 t Natur-Uran,
40 t schwach angereichertes Uran (zwischen 1,0 und 1,5 v. H.),
300 kg 20prozentig angereichertes Uran,
2000 t Graphit,
150 t schweres Wasser,
50–60 t Zirkon und
etwa 50 t Thorium.

Literaturverzeichnis

zusammengestellt von OStDir. Dr. Schuster, Bonn

1. Allgemeinverständliche Literatur

E. Bagge, K. Diebner, J. Jay	Von der Uranspaltung bis Calder Hall Ro ro ro Nr. 41
A. Einstein u. L. Infeld	Die Evolution der Physik Ro ro ro Nr. 12
W. Finkelnburg	Atomkraft heute und morgen Humboldt-Taschenbücher Nr. 20
D. W. Gail	Der Griff nach dem Atom Reich-Verlag, München
P. Jordan	Atomkraft – Drohung und Versprechen Heyne-Verlag, München
R. Jungk	Heller als tausend Sonnen Scherz & Goverts, Stuttgart
G. Löwenthal u. J. Hausen	Wir werden durch Atome leben Blanvalet, Berlin
G. Schuster u. K. Kozcy	Weltmacht Atom Maximilian-Verlag, Köln
H. Voigt	Atomenergie und Atomumwandlungen Demmig-Verlag, Darmstadt
F. Wachsmann	Die radioaktiven Isotope Dalp-Taschenbücher Bd. 309
C. v. Weizsäcker	Atomenergie und Atomzeitalter Fischer-Bücherei, Bd. 188

2. Weiterführende Literatur

P. R. Arendt	Reaktortechnik Physik-Verlag, Mosbach/Baden
W. Braunbek	Grundbegriffe der Kernphysik K. Thiemig KG, München
F. Cap	Physik und Technik der Atomreaktoren Springer-Verlag, Wien
W. Finkelnburg	Einführung in die Atomphysik Springer-Verlag, Berlin
H. Graewe	Atomphysik Dümmler-Verlag, Bonn
W. Heisenberg	Die Physik der Atomkerne Vieweg-Verlag, Braunschweig
W. Holzapfel	Der Weg zum Atom Braun-Verlag, Karlsruhe
W. Riezler	Einführung in die Kernphysik Oldenbourg-Verlag, München
W. Riezler u. W. Walcher	Einführung in die Kerntechnik Teubner-Verlag, Stuttgart

3. Deutsche Atomzeitschriften

Atomkernenergie, Verlag K. Thiemig KG, München
Atompraxis, Verlag G. Braun, Karlsruhe
Atomwirtschaft, Verlag Handelsblatt GmbH, Düsseldorf

